

文章编号: 1673-3363(2009)01-0001-14

# 中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望

缪协兴, 钱鸣高

(中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 中国是世界上少有的以煤炭作为主要能源的国家之一, 煤炭产量已经超过了世界总产量的三分之一, 与煤炭生产相关的资源破坏、环境损害以及生产事故现象十分突出, 因而我国学者率先提出了实现煤炭资源绿色开采的理念和科学研究与技术框架, 继而又提出了实现科学采矿的学术观点. 本文从煤炭资源绿色开采的内涵与框架、采动岩体结构理论和采动岩体渗流理论等方面较为系统地论述了煤炭资源绿色开采基础研究方面取得的主要进展; 以煤与瓦斯共采、保水采煤和矸石直接充填采煤等技术开发成果, 综述了在突破传统采煤技术理念上的煤炭资源绿色开采技术方面取得的重要进展; 从实现煤炭资源绿色开采应重视的基础科学研究、重点技术攻关、政府应履行的职能以及国家立法等方面对今后相关研究与技术开发工作作了简单展望.

**关键词:** 中国煤矿; 绿色开采; 关键层理论; 煤与瓦斯共采; 保水采煤; 矸石直接充填采煤

**中图分类号:** TD 82      **文献标识码:** A

## Research on Green Mining of Coal Resources in China: Current Status and Future Prospects

MIAO Xie-xing, QIAN Ming-gao

(State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering,  
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

**Abstract:** China is one of the very few countries using coal as its dominant energy resources, with the coal production exceeding one thirds of the total in the world. Some problems relating to coal mining are serious, such as resources destruction, environmental damage, and production accidents. Thus, Chinese scholars firstly proposed the concept of green mining of coal resources and scientific research and technological system for realizing the green mining. Then they put forward the academic viewpoint of realizing scientific mining. In this paper, we discuss, from the connotation and the basic system of the green mining, the structure theory of mining-induced rock mass, and the seepage theory of mining-induced rock mass, the main progresses achieved in the basic research of the coal resource green mining. According to the technical innovations of simultaneous extraction of coal and gas, water preserved mining, and the coal mining with gangue backfilling, we summarize the important progress in the coal resource green mining which has broken the traditional mining technology. Finally, we hold that more attention should be paid to achieving the coal resource green mining, such as the basic research, the key technology, the government's proper function, and the national legislation.

**Key words:** Chinese coal mine; green mining; theory of key stratum; simultaneous extraction of coal and gas; water preserved mining; the coal mining with gangue backfilling

收稿日期: 2008-07-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB209400);高等学校学科创新引智计划项目(B07028);国家自然科学基金重点项目(50634050)

作者简介: 缪协兴(1959-),男,江苏省江阴市人,博士,教授,博导,国家“973计划”项目首席科学家,从事力学与采矿工程方面的研究.

E-mail: xxmiao@cumt.edu.cn      Tel: 0516-83995518

目前,中国经济的发展严重依赖煤炭能源的支撑作用.同时,近年来煤炭产量的迅猛增长,凸显对资源与环境的影响.至今,与我国煤炭粗放型和超产能生产相伴的矿难事故还没有完全得到控制,而同样十分严峻的资源浪费与环境破坏也亟待从煤炭开采的源头去解决.以 2007 年为例,中国全年生产煤炭超过 25 亿 t.据统计,与 25 亿 t 煤炭产量相对应,排放煤层瓦斯气体 200 亿  $\text{m}^3$  左右,利用率仅为 20%;排放矿井水 60 亿  $\text{m}^3$  左右,利用率仅为 26%;排放煤矿矸石 3.5 亿 t 左右,矸石排放除占用大量的土地资源外,还会严重污染空气和地下水,甚至存在矸石山爆炸危险;我国煤炭开采回收率仅为 40% 左右,“三下”压煤是其重要根源.

鉴于粗放型的煤炭开采引发的严重矿难灾害、资源浪费和环境破坏现象,钱鸣高院士领导的研究团队率先提出了实现煤炭资源绿色开采的理念,相继发表了一系列旨在建立煤矿绿色开采基础理论和技术框架的学术论文<sup>[1-10]</sup>,并得到了学术界和工业界高度关注和广泛响应<sup>[11-15]</sup>.本文将围绕实现煤炭资源绿色开采这个主题,简单总结一下近年来在基础理论研究和应用技术开发方向取得的主要进展,并作相关展望.

## 1 煤炭绿色开采的基础研究

发展煤炭绿色开采理论和技术,不是对现有采煤理论、方法和技术的否定,而是在此基础上的发展与创新,并且具有更加丰富的技术内涵和经济原则.

### 1.1 煤炭资源绿色开采的内涵与框架

#### 1) 煤矿绿色开采的内涵

从广义资源的角度论,在矿区范围内的煤炭、地下水、煤层气(瓦斯)、土地、煤矸石以及在煤层附近的其他矿床,都应该是经营这个矿区的开发和保护对象.煤矿绿色开采以及相应的绿色开采技术,在基本概念上是要从广义资源的角度上来认识和对待煤、瓦斯、水等一切可以利用的各种资源.基本出发点是防止或尽可能减轻开采煤炭对环境和其他资源的不良影响.目标是取得最佳的经济效益和社会效益.根据煤矿中土地、地下水、瓦斯以及矸石排放等,绿色开采技术主要包括以下内容:水资源保护—形成“保水开采”技术;土地与建筑物保护—形成“充填开采”技术;瓦斯抽放—形成“煤与瓦斯共采”技术等等.

开采引起的安全与环境问题都与开采后造成的岩层运动有关(岩体不破坏上述问题都不会发

生),因此,绿色开采的重大基础理论为:采矿后岩层内的“节理裂隙场”分布以及离层规律;开采对岩层与地表移动的影响规律;水与瓦斯在裂隙岩体中的渗流规律;岩体应力场分布规律及岩层控制技术等等.

#### 2) 煤矿绿色开采的经济原则

随着经济的发展和国家对环境的要求,绿色开采技术必然将受到充分的重视.随着科技的发展,绿色开采中的部分技术可以成为产业,甚至可以利用变废为宝以进一步降低开采成本.另一方面若处理不好很容易增加煤矿企业的成本,尤其使一些本来开采成本较高的煤炭企业难以接受.

资源开发必须与环境协调,这是采矿者的责任.但首先必须解决煤炭开发的经济问题,在市场经济条件下矿业开发具有其本身的发展规律,例如煤炭的价值是由整个产业链系统表现出来,而具体的煤炭作为商品很难体现其在开采时的难度及技术含量.煤炭开采成本与售价不仅与技术有关,还与赋存状况及区位等条件有关,这显然与加工类型企业有本质的区别.如:有些条件下煤质虽差,但开采难度大(采深增加,构造复杂等),成本就很高,相反成本反而很低.

因此为了满足国家经济发展对能源的要求,而又要实现资源开发与环境的协调,必须从煤炭开采到利用的整个系统来考虑加以宏观调控,政府应根据各类情况在政策与税收等方面加以支持,以使煤炭企业得到健康发展.各个矿区开采对环境影响是不同的,加上开采成本也不一样,因此必须分类作出成本核算,以便提出希望政府给予的政策支持.

#### 3) 煤矿绿色开采的研究框架

实现煤炭资源的绿色开采是一项巨大的系统工程,单从科学技术研究来说也十分复杂,目前的进展在理论研究方向主要体现在采动岩体的结构运动理论和渗流理论等方面,在技术开发方面重点体现在煤与瓦斯共采、保水采煤和矸石直接充填采煤等方面.因此,现有的重点研究框架见图 1.

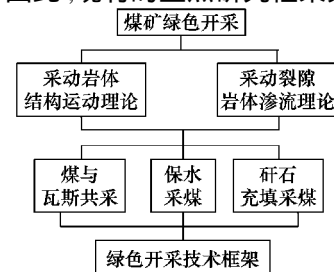


图 1 煤炭资源绿色开采的基本框架

Fig. 1 Basic system of the coal resource green mining

## 1.2 采动岩体结构理论

采动岩体结构理论<sup>[16-26]</sup>是在采场矿压理论等基础上发展起来的,最重要的核心是由采场矿压砌体梁力学模型发展到岩层控制的结构关键层力学模型。在采场覆岩中存在多个岩层时,对岩体活动全部或局部起控制作用的岩层称为结构关键层。结构关键层判别的主要依据是其变形和破断特征,在关键层破断时,其上部全部岩层或局部岩层的下沉变形是相互协调一致的,前者称为岩层活动的主结构关键层,后者称为亚结构关键层。也就是说,结构关键层的断裂将导致全部或相当部分的上覆岩层产生整体运动。

建立岩层控制的结构关键层力学模型,采用了典型的力学建模方法,抓住错综复杂的采动岩体运动中的主要因素——关键层结构,研究其变形、破断和结构运动规律,不仅解析了岩体内部的运动规律,更重要的是其控制地表移动和采动与巷道围岩的矿压显现,同时还控制采动岩体内部的裂隙演化。因此,与绿色开采有关的水与瓦斯在采动岩体中的运移规律,地表沉陷控制规律都可在深入研究采动岩体结构运动理论和渗流理论中得到揭示。

### 1) 结构关键层运动对采场矿压的影响

控制采场与巷道围岩稳定性是开发煤与瓦斯共采、保水采煤和矸石直接充填采煤等技术的基本理论内容,而采动岩体结构关键层运动对采场矿压起主要控制作用。这里,以主关键层运动控制采场来压为例。

所谓主关键层,是指对其上覆所有岩层运动起控制作用的坚硬岩层,主关键层破断会引起其上覆直至地表所有岩层的同步破断下沉。当覆岩中存在典型的主关键层时,由于其一次破断运动的岩层范围大,往往会对采场来压造成影响,尤其当主关键层初次破断时,将引起采场强烈的来压显现。

潞安王庄煤矿某综放工作面是一个超长试验工作面。工作面斜长达 270 m,走向长 700 m。开采 3<sup>#</sup>煤层,煤层倾角 2°~13°,煤层埋深 225~243 m,煤层厚度 6.86~7.14 m,平均 7.0 m。工作面采用低位放顶煤一次采全高,全部垮落法处理采空区。采高 3.0 m,放煤高度 4.0 m,一采一放为一循环,循环进度 0.8 m。采用的 ZZP4800-17/33F 放顶煤支架的额定初撑力为 3 958 kN,额定工作阻力为 4 800 kN,支护强度 0.65 MPa。该综放面覆岩关键层位置为第 2 层厚 7.5 m 的砂岩与第 12 层厚 12 m 的砂岩,其中第 1 层关键层为基本顶,第 2 层关键层为主关键层。

该综放面开采过程中进行了采场矿压观测,同时开展了地表下沉观测。工作面矿压观测结果表明,第 1 层关键层即基本顶的初次破断距为 23 m,周期来压步距为 8.4~12.7 m,周期来压的动载系数平均为 1.25。基本顶初次来压和周期来压对工作面造成比较强烈的矿山压力显现,主要表现为煤壁片帮、支架阻力急剧上升,在工作面还能听到顶板断裂的声音。但来压期间支架工作阻力并未超出其额定值,最大值为 4 023 kN,支架安全阀没有达到开启的程度。

地表沉陷实测结果表明,该综放面在推进 60 m 时,地表开始出现下沉,推进到 84.5 m 时,地表下沉急剧增大,最大达 0.92 m,地表有裂缝出现,局部隆起,地表下沉盆地开始出现,最大下沉点的下沉速度 0.1 m/昼夜。由此可以推断,当工作面推进到 85 m 左右时,上覆主关键层初次破断,导致地表沉陷加剧。工作面矿压观测表明,当工作面推进到 80~90 m 时,工作面矿压显现突然加剧,煤壁片帮深度在 1.0 m 以上,并且几乎整个工作面范围都出现片帮,端面上方部分区域出现断裂线,裂缝宽度达 20~30 mm。继煤壁片帮之后,即出现支架迅速增阻,速度可达每小时 400 kN/架,支柱迅速下缩,个别支架后柱可缩量仅剩 50~60 mm,支架空间变小,安全阀开启率达 22%,动载系数达 1.64。可见,造成工作面矿压显现加剧是由于主关键层初次破断引起的。

### 2) 结构关键层运动对地表沉陷的影响

研究表明,主关键层运动将对地表沉陷产生决定性影响,因而控制主关键运动是充填开采等技术的主控目标。上述实测给出了潞安王庄矿某综放工作面主结构关键层破断对地表变形的影响,这里用数值模拟的方法更加详细地说明主关键层对地表下沉影响的动态过程。

模型走向长度 450 m,垂直高度 110 m,开采深度 103 m。煤层为水平煤层,厚度 3.0 m。距煤层 30 m,厚 10 m 的细砂岩为覆岩主关键层,其上部为厚 60 m 的表土层。

根据设计的计算模型,主关键层将在采 72 m 时初次破断,采 112 m 时顶板发生第 1 次周期破断,采 152 m 时顶板第 2 次周期破断。由此得到主关键层破断前后地表下沉速度曲线如图 2 所示。由图 2 可见,主关键层破断时的地表下沉速度较主关键层破断前的地表下沉速度显著增大,从而导致地表下沉速度随主关键层破断呈现周期性增大的现象。

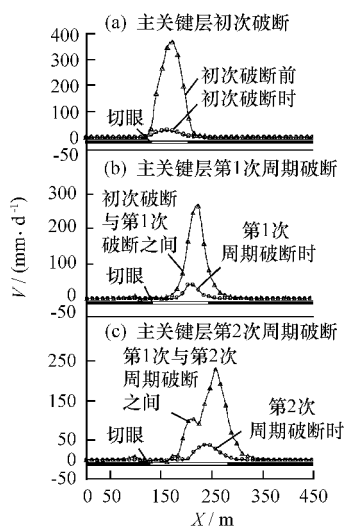


图 2 主关键层破断前后地表下沉速度曲线  
Fig. 2 Velocity curves for surface subsidence pre and post broken of main key strata

### 3) 结构关键层运动对采动裂隙的影响

研究表明,结构关键层运动对采动裂隙演化起主要控制作用.这里,以沛城某矿实际覆岩结构,采用模型实验对覆岩关键层下离层动态分布规律进行研究.图 3 为距煤层 30.5 m 处的主关键层下离层量沿走向分布随工作面推进变化的实验结果,图 4 为主关键层下最大离层量随工作面推进的变化.

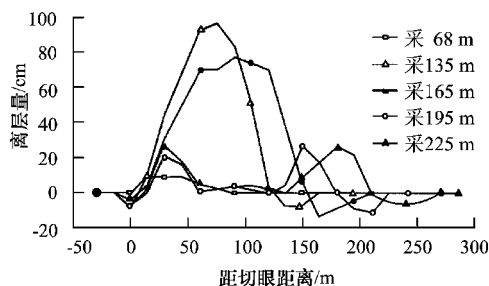


图 3 主关键层下离层分布随工作面推进的变化  
Fig. 3 Distribution of the separated strata below the main key strata with the advancing of working face

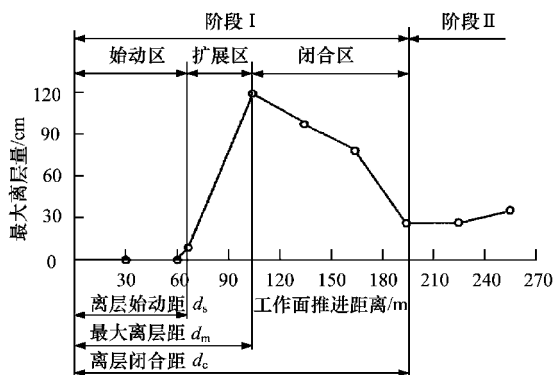


图 4 主关键层下最大离层量随工作面推进的变化  
Fig. 4 The maximum separated strata below the main key strata with the advancing of working face

由图 3, 4 可以看出,随着工作面推进,覆岩关键层下离层动态分布总体上呈现 2 阶段规律:

阶段 I: 从开切眼开始至关键层初次垮落. 该阶段内关键层下离层量沿走向分布曲线呈高帽状, 采空区中部离层最发育. 不同推进距时关键层下的最大离层量均位于各自走向采长的中部, 如由切眼采至 68, 135, 165 m 时, 关键层下的最大离层位置距切眼距离分别为 34, 70, 85 m 处. 此阶段内关键层下离层发展由如下 3 个区组成.

离层始动区 (1): 当岩移未发展至覆岩关键层下部时, 则关键层下不会出现离层, 一旦工作面推进距达到一定值时, 岩移发展至关键层下, 导致关键层下开始出现离层, 但其离层量很小, 该推进距称为关键层下离层始动距 ( $d_s$ ), 从切眼至离层始动距区间称为离层始动区. 实验结果表明, 主关键层下的  $d_s = 68$  m 左右, 此时主关键层下最大离层量仅为 8.8 cm 左右.

离层扩展区 (2): 随着工作面继续推进, 关键层下离层量不断增大, 当工作面推进距达某一值时, 关键层下离层量达到其最大值, 此时工作面距切眼距离称为最大离层距 ( $d_m$ ), 从开始出现离层至离层达最大值区间称为离层扩展区. 实验结果表明, 主关键层的  $d_m$  为 105 m 左右, 此时主关键层下最大离层量为 119 cm, 离层扩展区的长度为

$$d_m - d_s = 105 - 68 = 37 \text{ (m)}.$$

离层闭合区 (3): 当工作面推进距超过  $d_m$  后, 关键层下软岩的快速下沉过程已经结束, 其下沉速度小于上覆关键层下沉速度, 从而导致关键层下离层逐渐减少呈闭合趋势, 直至关键层发生初次垮落, 此时工作面距切眼距离称为关键层离层闭合距 ( $d_c$ ), 从最大离层至关键层初次垮落的区间称为关键层离层闭合区. 实验结果表明, 主关键层的  $d_c$  为 195 m 左右, 此时主关键层在采空区中部离层仅为 4 cm 左右, 离层闭合区长度为

$$d_c - d_m = 195 - 105 = 90 \text{ (m)}.$$

阶段 II: 关键层初次垮落以后, 此阶段内关键层在采空区中部离层趋于压实, 而在采空区两侧 (即切眼侧与工作面侧) 仍各自保持一个离层区, 关键层下离层量沿走向采长分布曲线呈驼峰状. 切眼侧的离层区是固定不动的, 而工作面侧的离层区是随着工作面开采而不断前移的, 该离层区的长度  $d_b$ 、最大离层量及最大离层量距工作面侧煤壁距离, 随着工作面推进基本保持不变. 实验结果表明, 工作面侧离层区的长度  $d_b = 60 \sim 75$  m, 相当于主关键层离层闭合距  $d_c$  的 1/3 左右, 该离层区最大

离层量为 26.5 ~ 35.5 cm, 是阶段最大离层量 119 cm 的 1/4 左右。

上述实验结果表明, 在关键层破断后的阶段区域, 采空区中部离层趋于闭合, 而在采空区两侧仍各保持一个离层发育区。因此, 从平面看, 由于关键层破断时形成的“砌体梁”结构, 在采空区四周存在一沿层面横向连通的采动离层发育区, 称之为采动裂隙“O”形圈。

### 1.3 采动岩体渗流理论

孔隙岩体或裂隙岩体的渗流多为定常渗流, 而煤矿突水和煤与瓦斯突出等事故多为渗流突变所致。因而传统岩石渗流理论无法合理描述采动破碎岩体渗流特性。由于受采动影响, 采场围岩一般处于峰后应力状态, 而破碎岩体的渗透率要远比孔隙岩体高得多, 加之附近承压水源的作用, 这就会由于渗流突变而引起重大突水事故。采动破碎岩体大致可分为 2 类: 1) 岩体原有构造再加开挖应力作用(应力超过峰值)破碎后仍处原位置的岩体, 可称原位采动破碎岩体; 2) 开挖破碎冒落后的堆积体, 可称为堆积采动破碎岩体。不论是何类破碎岩体, 其渗流特性与一般孔隙或裂隙岩体有着显著差异, 最本质的区别在于采动破碎岩体会发生渗流突变, 而采动破碎岩体中水的渗流突变是煤矿突水和煤与瓦斯突出等的主要根源。为了实现对煤矿突水瓦斯灾害的有效防治, 开发保水采煤和煤与瓦斯共采技术, 必须从整体上掌握采动破碎岩体渗流与渗流突变规律, 建立采动岩体渗流理论<sup>[27-32]</sup>。

#### 1) 采动破碎岩体渗流规律

由于采动破碎岩体渗流特性与一般岩体渗流特性有着显著差异, 现有的岩石渗流研究试验方法、手段无法适用, 所以为了测定其渗流特性和规律, 专门开发了 2 种专利试验装置, 即原位采动破碎岩体渗流特性试验装置(见图 5a), 堆积采动破碎岩体渗流特性试验装置(见图 5b)。

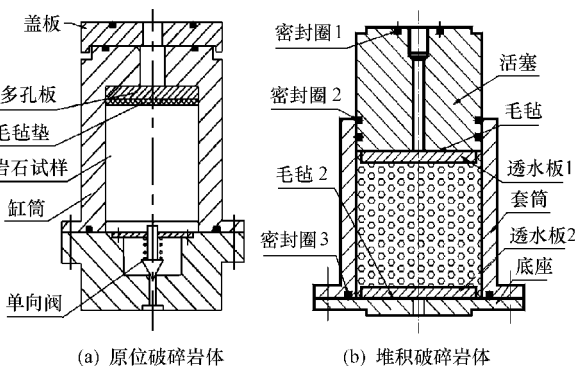


图 5 渗流试验装置

Fig. 5 Seepage equipment

这些装置与 MTS815.02 岩石力学伺服试验系统组合成一种新的试验系统, 研究采动破碎岩体渗透性的非 Darcy 渗流特征。

原位采动破碎岩体渗流规律: 以砂岩为例, 通过对一系列试样测试结果的分析, 得到渗透率和非 Darcy 流因子 的均值、均方差及其与轴向应变的回归关系分别为

$E(k)$  与轴向应变  $\sigma$  之间的回归关系

$$E(k) = 4.93 \times 10^{-3} e^{193} (\mu\text{m}^2).$$

$E(\sigma)$  与轴向应变  $\sigma$  之间的回归关系

$$E(\sigma) = 1.14 \times 10^{13} e^{-207} (\text{mm}^{-1}).$$

$(k)$  与轴向应变  $\sigma$  之间的回归关系

$$(k) = 5.14 \times 10^{-3} e^{193} (\mu\text{m}^2).$$

$(\sigma)$  与轴向应变  $\sigma$  之间的回归关系

$$(\sigma) = 2.81 \times 10^{13} e^{-188} (\text{mm}^{-1}).$$

$k^2$  的均值和标准差

$$E(k^2) = 5.27 \times 10^8 e^{198} (\mu\text{m}^4/\text{mm}),$$

$$(\sigma(k^2)) = 7.63 \times 10^8 e^{203} (\mu\text{m}^4/\text{mm}).$$

砂岩在单轴峰后状态下的渗透率很大, 远远超出(超出 2 个量级以上) MTS815.02 系统瞬态法测试岩石渗透率的最大值, 岩样的渗透率均值为指数规律增长关系。

砂岩在单轴峰后应变状态下的非 Darcy 流因子 随 增长而指数规律降低, 这说明 随着渗透率增加而降低, 但与渗流系统失稳有关的量  $k^2$  的均值按指数规律增长。

砂岩渗透特性  $k$  和 的离散性随着应变 增加没有显著变化。一般岩石的渗透呈非 Darcy 流特性, 尤其在低围压高轴压情况下更是如此。

大量测试结果表明: 原位采动破碎岩体渗流一般不符合 Darcy 定律, 其渗透特性的均值和均方差都随应变呈指数规律变化, 且变异系数较大, 一般在 1~5 之间, 与完整岩体相比, 渗透率呈量级增长, 这是岩石工程中发生渗流突变事故的主要因素之一。

堆积采动破碎岩体渗流特性: 以砂岩为例, 在压实渗透试验中, 为避免由于选取的时间过短而不能够读取稳定时的渗透数据结果, 采样时段一律取到 3 min, 即 180 s。另外, 考虑到一次试验可能不具代表性, 故对每种粒径做 3 组相同的试验, 以 3 组试验结果的平均值作为所需测定的渗透性质参数。

图 6, 7 给出了破碎砂岩在压实渗透的时间历程中渗透压差和渗透系数的变化曲线。图 8, 9 给出了破碎砂岩渗透压差和渗透系数随轴压的变化曲线。

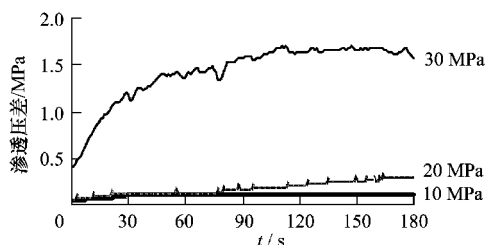


图 6 5~10 mm 粒径砂岩渗透压差随时间变化  
Fig. 6 Curves of permeability pressure difference vs. time for 5~10 mm sandrock

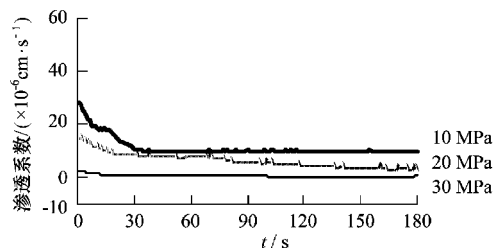


图 7 5~10 mm 粒径砂岩渗透系数随时间变化  
Fig. 7 Curves of permeability coefficient vs. time for 5~10 mm sandrock

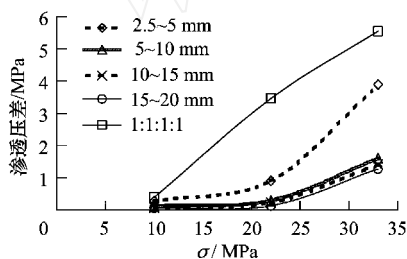


图 8 破碎砂岩渗透压差随轴压的变化  
Fig. 8 Curves of permeability pressure difference vs. axial stress for broken sandrock

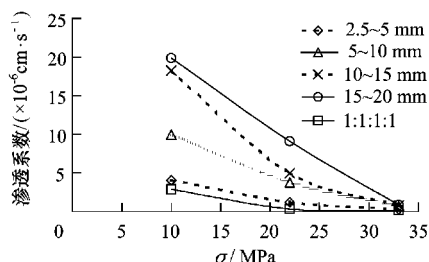


图 9 破碎砂岩渗透系数随轴压的变化  
Fig. 9 Curves of permeability coefficient vs. axial stress for broken sandrock

大量测试结果表明:较高压力作用下,破碎岩体的渗透系数比完整岩体有量级增加.随着压力增加,不同粒径破碎岩体的渗透系数都将下降,渗透系数随轴压呈负指数规律变化.相同压力作用下,破碎岩体粒径越小渗透越困难,对砂岩而言混合粒径时渗透系数最小.压力不变时,渗透系数随粒径呈幂次规律变化.水流速度对孔隙压有影响,对渗透系数的影响不大,随着流速的增加,渗透系数略有下降.在较高压力作用下,强度高而黏结力小的

岩体破碎以后渗透系数随压力的变化要相对较小,随粒径的变化则相对较大.在压力达到较高数值以后,粒径和岩性对渗透系数的影响都不再明显.

## 2) 采动破碎岩体渗流突变规律

由于采动破碎岩体的渗透率在  $10^{-15} \text{ m}^2$  量级以上,孔隙岩体渗透率一般为  $10^{-20} \text{ m}^2$ ,在渗流系统的控制方程中,必须考虑惯性项,采动破碎岩体非 Darcy 渗流是含有多个控制参量的偏微分方程描述的动力系统.通过建立在平衡态附近的演化方程,利用谱截断方法对系统的演化方程进行降阶,并利用 Lyapunov 第一近似理论分析了系统的分岔行为.结果表明,系统存在跨临界的 Hopf 分岔和切分岔,系统的动力学响应具有以下特点:相轨线具有包括平衡态吸引子、周期吸引子、混沌吸引子等多种形态;峰后岩石非 Darcy 渗流系统的动力学响应不是连续地依赖于控制参数,在一定条件下,控制参数的微小变化会引起系统稳定性的变化;当非线性项逐渐增大时,非 Darcy 渗流系统相轨线的对称性发生破缺,从而进入混沌状态.

在采矿工程中,随着工作面的推进,围岩的应力状态和孔隙、裂隙结构是时变的,从而围岩渗透特性和边界条件也是时变的.在对渗透特性变化规律合理简化的基础上,采用 Chebyshev 配点法对时变渗透特性和时变边界条件的渗流系统的动力学响应进行了系统研究,发现渗透特性的变化和边界压力的变化都能导致渗流系统失稳.理论分析和数值计算均表明:在渗透特性变化过程中,当达到临界条件时,系统不会向新的平衡态演化,必定失稳突变;在周期性压力边界条件下,非 Darcy 渗流系统可能演化成新平衡态附近的周期运动,也可能失稳;边界压力的微小周期变化,可能导致渗流系统稳定性的突变.从而在机理上揭示了采动破碎岩体会发生渗流突变的特性.因此,可以根据采动破碎岩体发生渗流突变的条件和参数,判别煤矿突水和煤与瓦斯突出发生的危险性.

## 3) 采动岩体渗流突变判据

从煤矿采动破碎岩体渗流特性参数测定入手,建立了采动岩体的非 Darcy 渗流运动控制方程,再通过非线性动力学分析,揭示了该系统会发生渗流突变的动力学现象,因而给出了判断系统稳定性的条件.

不同的围岩条件,将会形成不同的突水或瓦斯突出判据,这里以采场顶底板突水判据  $k$  为例,如下:

$$k = \frac{4 \rho_0 (p_0 - p_n) \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_a^i} \frac{h_i}{c_a^i}}{\left( \sum_{i=1}^n \frac{\mu h_i}{c_a^i} \right)^2} < 1, \quad (1)$$

式中:  $h_i$  为  $n$  层岩层中各层的厚度;  $i$  为渗透率;  $i$  为非 Darcy 流因子;  $c_a^i$  为加速度系数;  $p_{i-1}$  和  $p_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为两端的压力;  $\rho_0$  为水的质量密度;  $\mu$  为水的动力黏度;  $\rho_0$  为参考压力  $p_0$  下对应的流体质量密度。

当  $k < 1$  时, 关键层与其上的岩层复合仍具有隔水作用, 不会出现渗流突变; 当  $k = 1$  时, 关键层与其上的岩层复合已经不具备隔水作用, 会出现渗流突变, 即突水灾害。

## 2 煤与瓦斯共采

### 2.1 煤与瓦斯共采的“O”形圈原理

煤层瓦斯抽放方法可分为 2 类: 1) 煤层采前抽放; 2) 煤层开采过程中及采后的卸压抽放。研究表明, 我国煤储层普遍具有变质程度高、渗透率低、压力小和含气饱和度低的特点, 70% 以上煤层的渗透率小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 这对我国开展煤层瓦斯采前预抽是极为不利的。而如何提高煤层采前渗透率是目前尚未解决的难题。实践表明, 一旦煤层开采引起岩层移动, 即使是渗透率很低的煤层, 其渗透率也将增大数十倍到数百倍, 甚至更多, 为瓦斯运移和抽放创造了条件。因此, 应充分利用采动过程中岩层移动对煤层渗透率的增大作用, 重视对采动卸压瓦斯抽放的研究, 走“煤与瓦斯共采”之路。

覆岩采动裂隙分为 2 类: 1) 沿层离层裂隙, 它将在整个上覆岩层范围内发展, 导致煤层膨胀卸压; 2) 穿层竖向破断裂隙, 它是上覆邻近层卸压瓦斯流向开采工作面及其采空区的通道, 仅在覆岩一定高度范围内发育, 其高度 (称之为“导气裂隙带”高度) 与煤层采高及覆岩岩性有关, 一般工作面 (非综放面) 不超过 70 ~ 100 m。而处于“导气裂隙带”高度以上覆岩区 (称之为“上覆远距离采动区”), 煤层卸压瓦斯不能流动到下部工作面及其采空区。相对开采煤层而言, 可将卸压瓦斯分为 3 类: 本煤层卸压瓦斯; 邻近层卸压瓦斯, 包括上邻近层与下邻近层; 上覆远距离煤层卸压瓦斯。其中本煤层与邻近层卸压瓦斯会涌入回采工作面及其采空区, 引起回采空间尤其是工作面上隅角瓦斯积聚与超限, 造成安全隐患。上覆远距离煤层卸压瓦斯不能流入开采工作面, 因而不会对回采安全造成危害, 且就煤层气资源开发而言, 上覆远距离煤层卸压瓦斯可大

面积抽放出来。

国内外卸压瓦斯抽放研究存在 2 个方面不足: 1) 对覆岩采动裂隙场分布特征缺乏整体把握与理性认识, 影响到抽放钻孔布置的优化; 2) 国内外卸压瓦斯抽放是从开采层工作面安全生产出发, 主要研究本煤层与邻近层卸压瓦斯抽放, 而对上覆远距离煤层卸压程度及卸压瓦斯抽放效果缺乏研究。针对上述不足, 基于岩层移动关键层理论, 将覆岩移动及其裂隙场分布规律应用于卸压瓦斯抽放研究之中, 建立了卸压瓦斯抽放钻孔布置的基本原则, 即卸压瓦斯抽放“O”形圈原理。

通过相似模型实验、计算机图像分析、离散元数值模拟、实测等方法, 揭示了长壁开采覆岩采动裂隙场两阶段发展与“O”形圈分布规律。即从开切眼开始, 随着工作面推进, 采动裂隙不断发展, 采空区中部采动裂隙最发育, 此为采动裂隙发展的第 1 阶段。当采出面积达一定值后, 进入采动裂隙发展的第 2 阶段, 此时, 位于采空区中部的采动裂隙趋于压实, 而在采空区四周存在一连通的采动裂隙发育区, 称其为采动裂隙“O”形圈。采动裂隙“O”形圈能长期保持, 是卸压瓦斯的储存空间与流动通道。

煤层卸压瓦斯的流动是一个连续的 2 步过程: 第 1 步, 以扩散的形式, 瓦斯从没有裂隙的煤体中流到周围的裂隙中去; 第 2 步, 以渗流的形式, 瓦斯沿裂隙流到抽放钻孔处, 采动裂隙成为瓦斯流动的通道。显然, 将抽放钻孔布置在裂隙发育且能长时间保持的区域, 有利于卸压瓦斯流动到抽放钻井中。根据覆岩采动裂隙分布特征建立卸压瓦斯抽放“O”形圈原理为: “O”形圈相当于一条“瓦斯河”, 周围煤岩体中的瓦斯解析后通过渗流不断地汇集到这条“瓦斯河”中。因此, 卸压瓦斯抽放钻孔应打到采动裂隙“O”形圈内, 以保证钻孔有较长的抽放时间、较大的抽放范围、较高的瓦斯抽放率。为了将抽放钻孔打到“O”形圈内, 抽放孔的终孔点或抽放巷位置距回风巷水平距离  $s$  应按式确定

$$s = H - (B + H \cot \alpha) \tan \beta \sin \alpha + (B + H \cot \alpha) / \cos \alpha, \quad (2)$$

式中:  $s$  为抽放孔的终孔点或抽放巷位置距回风巷水平距离;  $H$  为抽放孔的终孔点或抽放巷与煤层的垂直距离, 不同类型的抽放孔 (巷) 取值不同;  $B$  为钻孔 (巷) 距“O”形圈外边界的距离;  $\alpha$  为煤层倾角;  $\beta$  为裂隙边界 (即“O”形圈外边界) 与开采边界的连线与煤层的夹角。

卸压瓦斯抽放“O”形圈原理是指导卸压瓦斯抽放孔 (巷) 布置的基本原则。这一原则已在淮北、



阳泉等矿区的上覆远距离煤层卸压煤层气抽放、邻近层卸压瓦斯抽放、本煤层采空区卸压瓦斯抽放中进行了试验与应用。

## 2.2 采动卸压瓦斯抽采技术

这里,以近距离 4 层煤层群为例,说明已经实

施的一些被保护层采动卸压瓦斯抽采方法.被保护层卸压瓦斯抽采如图 10 所示,图 10a~f 分别展示了走向高抽巷、倾向高抽巷、顶板走向孔、地面钻孔和上、下煤层底板穿层孔布置方式的煤与瓦斯共采方法。

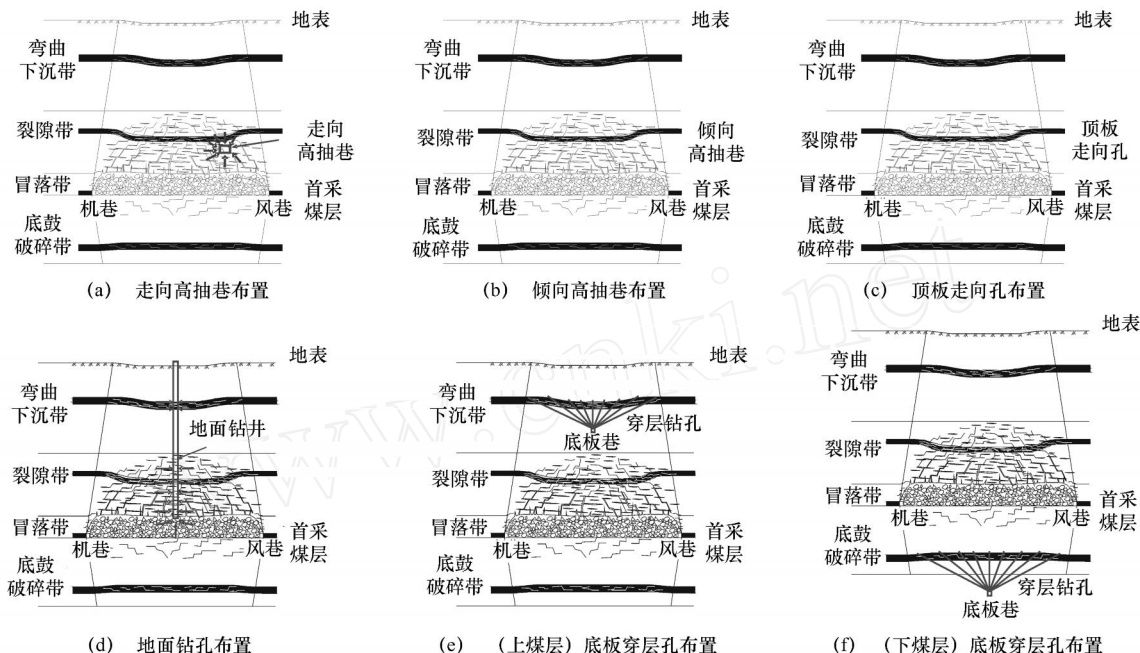


图 10 被保护层卸压瓦斯抽采图例

Fig. 10 Pressure-relief gas drainage in protected coal seams

中国煤矿保护层开采实践证明,保护层开采之后,上被保护层膨胀变形可达 0.784%~2.64%,煤层透气性增加 1 000~3 000 倍,卸压瓦斯抽采率达 60%以上,有效层间距达到 150 m;下被保护层膨胀变形可达 0.2%~0.72%,煤层透气性最大可增加 1 000 多倍,卸压瓦斯抽采率达 50%以上,有效层间距达到 50 m.通过卸压瓦斯的抽采,不仅可以区域性消除煤层的突出危险性,而且可以实现变高瓦斯煤层为低瓦斯煤层的目的,大幅度提高了突出煤层安全开采效率.淮南矿业集团通过保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采,突出煤层工作面单产由平均 1 800 t/d 提高到 10 000 t/d.

## 2.3 煤与瓦斯共采的效果

经过近年来的科技攻关、安全技术改造和加大监管及监察力度,中国煤矿瓦斯治理科技水平、装备水平和管理水平取得了长足进步,煤与瓦斯共采取得了显著成效.图 11 给出了中国煤矿瓦斯抽采量的增长情况,中国煤矿瓦斯抽采技术的进步,有利地促进了煤矿安全生产,在煤炭产量快速增长的条件下,煤矿死亡人数和百万吨死亡率逐年下降,2007 年国有重点煤矿百万吨死亡率降低到 0.38,且没有发生瓦斯爆炸事故。

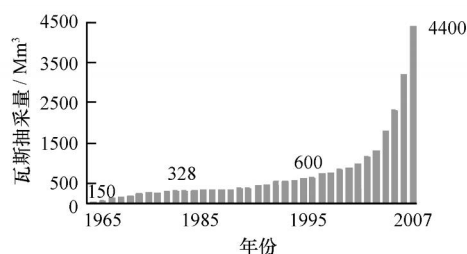


图 11 中国煤矿瓦斯抽采量增长情况

Fig. 11 Increasing situation of gas drainage amount in coal mines of China

## 3 保水采煤

保水采煤包含水资源保护、水资源利用(煤水共采)和水灾害防治等多重内容。

### 3.1 隔水关键层的定义

用图 12 来说明所谓隔水关键层.从图 12 中可以看到,一般突水工作面到水源之间会被若干层岩层所阻隔,而各岩层由于其分层特性和所处采动岩体中的位置不同,其隔水性能是不同的,水最终需要穿透的那部分岩层或最终被阻隔住的岩层被称为隔水关键层.水要突破隔水关键层有 2 条途径,即天然构造通道和采动裂隙贯通,无论那条通道被贯通或两条通道被同时贯通,突水通道也即形成。



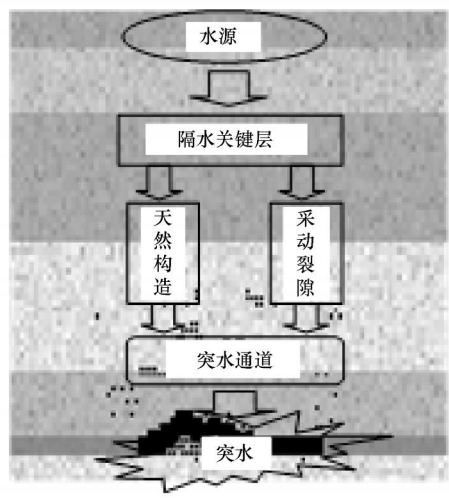


图 12 隔水关键层示意图  
Fig. 12 Sketch map of WKS

根据煤系地层的构造特征,可以推断出隔水关键层具有 3 层含义:1) 水源与工作面之间有明显的较厚软弱隔水层(例如厚表土层),则不易形成突水灾害;2) 假设煤层上部含水层在结构关键层的上方,或煤层下部含水层在结构关键层的下方,如果结构关键层采动后不破断,则结构关键层可起到隔水作用,同时就是隔水关键层;3) 如果结构关键层采动后会发生破断,但破断裂隙被软弱岩层所充填,裂隙被弥合,不形成渗流突水通道,则结构关键层与软弱岩层组合形成复合隔水关键层.由隔水关键层的含义可知,隔水关键层与岩层控制中的结构关键层之间,既有区别,也有共性.因此,可以将煤矿突水灾害防治和水资源保护的目标选定为对隔水关键层完整性的保护,也即控制不形成突水通道或渗流突变通道.

3.2 隔水关键层原理

图 13 为保水采煤的隔水关键层原理.

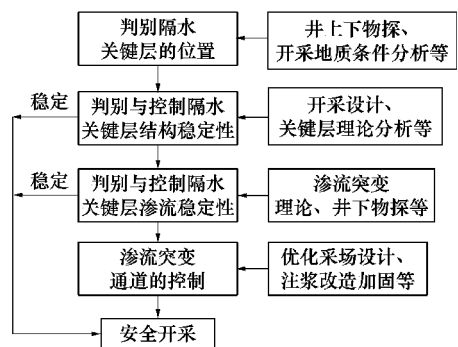


图 13 保水采煤的隔水关键层原理  
Fig. 13 Principle of WKS in water-preserved mining

可见保水采煤的隔水关键原理可以归纳为 4 个步骤:第 1 步,判别隔水关键层的位置;第 2 步,判别与控制隔水关键层结构的稳定性;第 3 步,判

别与控制隔水关键层渗流的稳定性;第 4 步,对渗流突变通道的控制.

在判别隔水关键层的位置方面,主要包括井上下物探分析,探明地质构造及水源分布规律等,进而需要进行水文地质和构造地质等分析以及岩层控制的结构关键层位置判别等,从物探、地质和开采等角度综合分析判别隔水关键层在采动岩体中的位置.

在判别与控制隔水关键层结构稳定性方面,主要包括开采设计,确定采区布置及工作面大小等,进而采用岩层控制的关键层等理论、数值模拟和物理模拟等方法分析结构关键层强度及破断规律.如采动岩体结构关键层是稳定的,则可安全保水开采.

在判别与控制隔水关键层渗流的稳定性方面,包括井下采区(工作面)精细物探,更详细掌握结构层、软弱层、构造及水源的分布,进而分析采动岩体的渗流运动规律及发生渗流突变的通道与危险性.如渗流运动是稳定的,则可安全开采.

在渗流突变通道的控制方面,主要包括进一步优化采区和采场的设计,改变采动覆岩结构关键层的破断形态,也即改变可能形成的渗流突变通道,进而对构造和可能形成的渗流突变通道实施注浆改造等措施,实现安全开采.

3.3 采场底板突水防治

保水采煤在不同的矿区有不同的技术内涵,缺水矿区要以水资源保护和利用为主;大水矿区,要以减少水资源破坏和防治水灾害为主.这里,以大水矿区为例,运用保水采煤的隔水关键层原理,在苏北某矿区进行了采场底板突水灾害防治实践.第 1 个实践区为某矿 21201 工作面,是屯头系煤层二采区首采工作面,工作面东以东一采区隔离煤柱为界,西以张庄大断层保护煤柱为界,工作面底板标高 - 370 ~ - 420 m,工作面长度 120 m,沿倾斜方向推进长度 800 m,煤层倾角 0 ~ 14°,平均 8°,煤层厚度 1.1 ~ 1.65 m,平均 1.5 m,地质储量 19.7 万 t,可采储量 18.5 万 t.

煤层直接底为 0.4 m 的土岩,老底为 2.2 m 粉砂岩及十三灰岩,均不含水,本溪组灰岩为底板直接充水含水层,在未与奥灰连通的条件下,富水量较弱,但从勘探报告及地面水文观察来看,两者具有明显的水力联系.

本区域重要水害隐患是下部的奥陶系灰岩水,该含水层距离屯头系煤层底板 40 ~ 45 m,具有水量丰富、水压大的特点,周围矿井在开采屯头系煤

层过程中发生了多次重大突水事故. 图 14 为具体运用隔水关键层原理的分析判别过程. 从图 14 中可以看到,在具体隔水关键层位置判别时,进行了采矿地质条件分析,该区域突水系数达到了临界值的 1.5 倍.

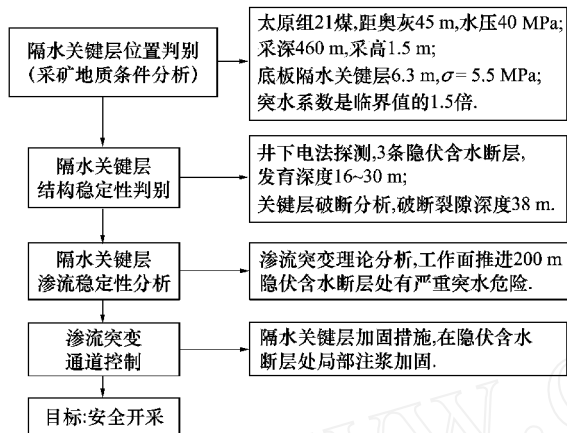


图 14 隔水关键层原理在底板突水防治中的判别流程  
Fig. 14 Differentiate flow for principle of WKS in prevention of water inrush from floor

在隔水关键层结构稳定性判别时,分别采用物理模拟和数值模拟的方法对底板的破断位置及深度进行了分析,其破裂深度可达 38 m,已接近贯穿底板隔水层.底板破坏区域的数值模拟见图 15. 工作面揭露后的井下电法探测还发现发育深度达 16 ~ 30 m 的 3 条隐伏含水断层,具体位置见图 16.



图 15 底板破坏区域的数值模拟  
Fig. 15 Numerical simulation on the failure area in floor

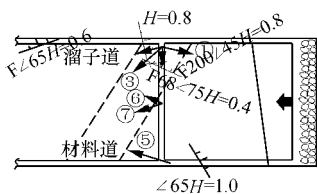


图 16 底板隐伏含水断层与注浆钻孔布置图  
Fig. 16 Layout of the buried fault with water and the grouting hole in floor

通过采动岩体渗流理论分析,工作面推进 200 m 左右区域,在隐伏含水断层区域具有严重的渗流突变危险,必须采用底板注浆加固措施. 注浆加固后的底板岩样见图 17,岩样中的白色条带部分即为凝固后的浆体. 经试验测定,该岩样的强度高于同类完整岩体岩样的强度. 最终,该工作面实现

了安全回采.

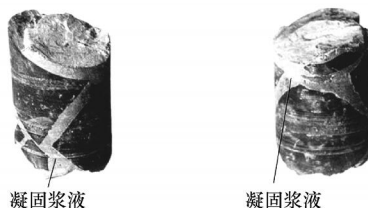


图 17 底板注浆区域的岩石采样  
Fig. 17 Rock sample in grouting area of floor

## 4 矽石直接充填采煤

利用井下采空区处置煤矽石的充填采煤方法,既可以减少煤矿固体废弃物排放,又可以减轻开采沉陷灾害、提高矿井资源回收率,是实现煤矿绿色开采的关键技术途径之一. 目前,已经基本形成了矽石直接充填采煤的技术框架,其中包括综采矽石充填技术和普采矽石充填技术等.

### 4.1 矽石直接充填采煤的技术框架

针对煤矿矽石的露天排放和大量的“三下”压煤现象,已经开发了矽石直接充填置换煤炭的成套技术(包括方法、工艺和设备),并建立了矽石充填采煤的矿压分析和岩层运动与地表沉陷预计方法,以及开发出了井下煤流分选设备与系统、井下矽石运输系统等,进而将其成功用于“三下”压煤和其它煤柱的回采,形成了原创性的矽石置换煤成套技术和应用体系,其总体技术框架如图 18 所示.

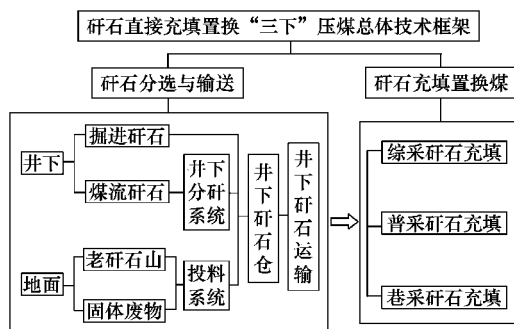


图 18 矽石充填置换煤总体技术框图  
Fig. 18 General technological framework of coal replacement with waste rock

### 4.2 综采矽石充填技术

长壁综采是我国目前中厚煤层或厚煤层分层开采最常用的采煤方法,研究开发与长壁综采衔接的高效矽石充填技术,实现长壁综采回采工艺与矽石机械化充填工艺的优化组合. 工艺流程为:由井下运矽系统将矽石输送上悬挂在综采充填液压支架后部的充填输送机,再由充填输送机的漏矽孔将矽石充入采空区,而受综采支架掩护的工作面割煤、运煤系统完全与普通综采相同,采煤与充填可

实现并行作业.将煤矿“掘、采”二元开采技术体系提升为“掘、采、充”三元开采模式.

矸石充填液压支架的功能是要实现架前掩护采煤作业,架后掩护矸石充填作业.其基本原理是:支架前梁下布置综采机组设备进行采煤作业,支架后取消斜掩护梁而设平行短尾梁,尾梁下吊挂一部矸石充填输送机,运输机槽板上开若干可控制的落矸孔,矸石充填输送机和上巷的运矸皮带输送机相联接,将矸石运进采空区并从落矸孔中落下,以实现充填.

矸石充填液压支架前、后配备双侧同向不等位的两部输送机,即前部回采工作面刮板输送机和后部的位于采空区的后悬式矸石充填输送机.充填液压支架除了满足综采面生产时的顶板支护要求,同时满足充填采空区的目的.

充填矸石通过后悬式矸石充填输送机溜槽槽板的落矸孔落下,落矸孔的大小是根据充填矸石的塌落角、充填高度、输送量确定或调节.为有效控制矸石的充填范围,在溜槽的侧面增设插板,以控制落矸量.后悬式矸石充填输送机受支架尾梁掩护,可保证充填设备的安全,同时设备维修时可以采用前移支架达到维修空间时进行,充填过程中无需人员进入充填区.充填顺序由下向上,当下面一个落矸孔充填到矸石充填输送机的悬挂高度后,即关闭下一个孔再开启上一个充填落矸孔,当最上方的一个落矸孔下方也充填到一定高度后,再全部打开所有插板,对矸石进行推平压实,实现“自充自压”;同时矸石充填输送机会在矸石的反作用力下自动抬起,直至充分接近尾梁.

#### 4.3 普采矸石充填技术

长壁普采仍是我国目前应用普遍的采煤工艺,研究开发与长壁普采配套的高效矸石充填技术设备和工艺,对于全面推广矸石充填采煤技术至关重要.其主要的技术包括:研制了与长壁普采、炮采配套的矸石运输和高速抛矸充填成套设备,开发了与长壁普采、炮采工作面配套的矸石充填采煤工艺,实现采煤与充填的并举,解决了原生矸石密实充填采空区的技术难题;构建了包括煤矸石的处置与转运、矸石充填和矿压控制的采煤工作面原生矸石充填与开采一体化技术.

高速动力抛矸机是实现普采、炮采单体液压支柱工作面后方采空区矸石密实充填的关键设备.自主成功研发了“V”型花纹抛矸皮带和高度可调、伸缩自如的高速动力抛矸机,可将原生矸石以较快的冲击速度充填到采空区内,以达到“高速冲击,挤压

密实”的目的,解决了矸石密实充填采空区的技术难题.高速动力抛矸机主要包括电动机、驱动滚筒、转向滚筒、托辊、抛矸皮带和支架等,其结构和工作原理如图 19 所示.

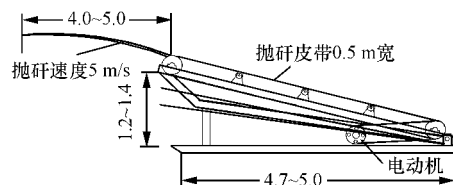


图 19 高速动力抛矸机结构及工作原理示意图 (m)

Fig. 19 Structure of high-speed dynamical waste rock caster and its working principle Sketch

普采工作面生产系统布置:经过系统设计研究和对比试验分析,确定出普采工作面生产系统布置形式如下:工作面下巷运煤,上巷运矸,在工作面铺设 1 部运煤溜子和 1 部矸石充填溜子,运煤溜子随工作面推进前移,矸石充填溜子随充填而缩短.依据充填量决定采煤量,确保充填与采煤一体化作业.工作面充填开采面布置如图 20 所示.

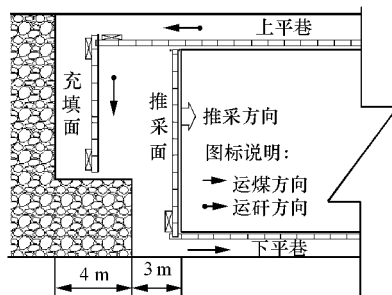


图 20 普采充填采煤工作面布置

Fig. 20 Layout of backfilling working face by CMC

## 5 研究展望

实现煤炭资源绿色开采应成为资源环境领域科学研究的重点.首先应改变把与煤炭资源共生的瓦斯、水、矸石等资源作为灾害和污染源加以“防与治”的观念,而要将其作为宝贵的资源加以保护、开采和利用,同时达到防治灾害和保护环境的目.进而应从基础科学研究的范畴,系统研究与煤炭资源伴生的瓦斯、水等资源赋存、地质构造、采动结构运动与裂隙演化、瓦斯和水等在采动岩体裂隙中的运移和渗流突变、开采沉陷及环境演化等机理和规律.这里,我们是指实现煤炭资源绿色开采,资源开采与环境协调发展理念下的地质构造、矿山压力、开采沉陷、开采方法等研究,应是突破传统理念和理论框架的发展与创新.这种理念下的科学研究已经开始,并正展示出了良好的发展势头,例如采动岩体结构运动理论、采动岩体裂隙演化理论、采动

岩体渗流理论,充填开采的等价采高理论等等,已为煤炭资源绿色开采技术发展起到了一定的指导和推进作用。

实现煤炭资源绿色开采应从采煤方法的源头进行技术开发与创新。实现煤与瓦斯共采,包含着一系列的方法与技术创新问题,例如,首采煤层和采区的布置、高抽巷的布置、抽采孔的设计、瓦斯钻孔机具与工艺、通风系统设计、沿空留巷以及瓦斯气体的管道运输与利用等。以保水采煤为例,首先要把握保水与采煤之间的度和原则问题,保水与采煤并不是绝对的矛盾,采煤需要水,控制得好,水位可以恢复,水资源还可以重复利用。缺水矿区重在保水采煤和水资源的重复利用,而大水矿区则重在煤水共采和水灾防治。关于解决“三下”压煤开采和煤矸石等矿区固体废弃物循环利用问题,传统的充填采煤没有从采煤方法入手,因而始终难于解决充填的通道和空间问题。现在开发的矸石(固体废弃物)直接充填置换“三下”压煤技术就是从开采支护系统及工艺入手,做到采煤与充填综合机械化并行作业,既能实现安全高效采煤,又能达到低成本、高效率充填。

实现煤炭资源绿色开采是政府应履行的一项重要责任。政府首先应起到管理和监督资源开采中的环境保护职能,并且扶植与环境相协调的资源开采创新技术的研发工作。事实上,我国政府近年来加大了对相关基础研究和科技创新立项投入,例如,相继以国家重大基础研究项目(973 项目)、863 项目、支撑计划项目、重大装备项目、自然科学基金重点项目,等等方式支持煤炭资源绿色开采基础研究和攻关,也取得了显著的成效。政府及时出台各种节能减排、环境保护等政策,已成为企业采用绿色开采技术的重要导向。企业在履行必要的社会责任后,追求利益的最大化是其发展的主要动力之一,政府对于积极开发并采用煤炭资源绿色开采技术的企业,应在税收等经济政策方面加以重点照顾,相反,则应加以限制和整顿。

国家立法是一把双刃剑,在我国严重依赖煤炭能源,而且生产方式还较落后,生产能力还不足的形势下,系统立法限制粗放型煤炭生产还时机不成熟,还有可能限制创新技术的发展。但是实现煤炭绿色开采,必须从立法上加以保障。以美国为例,早在 20 世纪 70 年代,美国日益扩大的煤炭生产规模与水环境之间的矛盾就已日益尖锐。例如,美国在 20 世纪 70 年代就已经关注黄石河流域煤炭资源开采与水资源消耗之间的矛盾,开始研究工业、农

业及其它行业间水资源的竞争问题<sup>[33]</sup>。蒙大纳的 Tongue 河盆地在 20 世纪 70 年代进入煤炭大规模开采期,也开始研究采矿引起的河床疏干、水质恶化、水生生态系统遭受破坏等现象<sup>[34]</sup>。美国西部自 20 世纪 70 年代末就把节水、保水作为影响其战略发展的要事<sup>[35]</sup>。在这样的历史背景下,1977 年 8 月 3 日美国总统卡特(Jimmy Carter)签署了采矿管理与复垦法案(Surface Mining Control and Reclamation Act, SMCRA)。SMCRA 是美国第一部具里程碑意义的联邦采矿环境保护法,为露天和井下煤矿的管理和复垦提供了环境保护标准;同时,成立了专门的联邦采矿管理办公室(Office of Surface Mining, OSM),监督、规范矿区的环境保护和恢复<sup>[36]</sup>。因此,美国在资源开发中的环境保护立法是我们可以借鉴的。

绿色开采是形成矿区绿色家园的重要技术组成,目前还仅仅是开始。能否实现决定于经济的合理与技术的可行,希望政府充分考虑我国煤炭作为主体和可靠能源,在产业链上又处于初级产品,分配上不合理等特点,对煤炭企业经济关心与支持,使煤炭企业健康发展。在科学方面,应该将岩层运动对工作面的矿山压力影响转为研究开采后岩层运动对岩体内形成空隙及其对气、液体的渗流规律的影响,以及研究再次形成岩体结构用来保护地面的可能性。在技术上涉及到充填和复垦、瓦斯抽采、保水技术等,各矿区应根据自身的特点,形成各自的模式(例如,东部以保护地面为主,而西部则以保护水资源为主)。应该加强研究各类矿区保护生态环境的模式和经济评价体系及其与企业成本的关系,为政府及时制定政策提供依据。

#### 参考文献:

- [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 Ming-gao, XU Jia-lin, MIAO Xie-xing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 343-347.
- [2] 钱鸣高,缪协兴,许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 1-7.  
QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing, XU Jia-lin. Green mining of coal resources harmonizing with environment[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 1-7.
- [3] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等. 论科学采矿[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 2(1): 1-10.  
QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing, XU Jia-lin, et al.

- On scientized mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008,2(1):1-10.
- [4] XU Jia-lin, ZHU Wei-bin, LAI Wen-qi, et al. Green mining techniques in the coal mines of china [J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 2004,52(12):395-398.
- [5] XU Jia-lin, QIAN Ming-gao. Study on influences of key stratum on mining-induced fractures distribution in overlying strata[J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 2006,54(12):240-244.
- [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 Jia-lin, QIAN Ming-gao. Concept of green mining and its technical framework[J]. Science & Technology Review, 2007,25(7):61-65.
- [7] 钱鸣高. 绿色开采的概念与技术体系[J]. 煤炭科技, 2003(4):1-3.
- QIAN Ming-gao. Technological system and green mining concept[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2003(4):1-3.
- [8] 缪协兴,张吉雄. 矸石充填采煤中的矿压显现规律分析[J]. 采矿与安全工程学报,2007,24(4):379-382.
- MIAO Xie-xing, ZHANG Ji-xiong. Analysis of strata behavior in the process of coal mining by gangue backfilling[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007,24(4):379-382.
- [9] 张吉雄,缪协兴,茅献彪,等. 建筑物下条带开采煤柱矸石置换开采的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007,26(增1):2687-2693.
- ZHANG Ji-xiong, MIAO Xie-xing, MAO Xian-biao, et al. Research on waste substitution extraction of strip extraction coal-pillar mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(Supp 1):2687-2693.
- [10] 缪协兴,浦海,白海波. 隔水关键层原理及其在保水采煤中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008,37(1):1-4.
- MIAO Xie-xing, PU Hai, BAI Hai-bo. Principle of water-resisting key strata and its application in water-preserved mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008,37(1):1-4.
- [11] 刘勇,刘萍,曾建荣. 采矿业绿色开采法律体系探讨[J]. 煤矿安全,2008,39(1):98-101.
- LIU Yong, LIU Ping, ZENG Jian-rong. Discussion on the legal system of green mining in mining industry[J]. Safety in Coal Mines, 2008,39(1):98-101.
- [12] 汪海平,王庆,兰永伟. 煤矿的绿色开采[J]. 煤炭技术,2007,2(9):51-53.
- WANG Hai-ping, WANG Qing, LAN Yong-wei. Lasting exploit of mine coal[J]. Coal Technology, 2007,2(9):51-53.
- [13] 崔丽琴. 绿色开采创新理念与矿区可持续发展[J]. 安全与环境学报,2006,6(B07):54-55.
- CUI Li-qin. Green mining innovative idea and the sustainable development of mining area[J]. Journal of Safety and Environment, 2006,6(B07):54-55.
- [14] 祝怡斌,张晓倩. 矿山开发环境评价应注意的几个循环经济问题[J]. 金属矿山, 2006(2):72-74.
- ZHU Yi-bin, ZHANG Xiao-qian. Issues of cycle economy needing attention in environment evaluation of mine development[J]. Metal Mine, 2006(2):72-74.
- [15] 龙如银,董洁. 煤炭企业实施绿色开采的博弈分析及政策建议[J]. 中国矿业,2005,14(2):17-20.
- LONG Ru-yin, DONG Jie. Game analysis on mining enterprises carrying out green mining and the policy recommendations [J]. China Mining Magazine, 2005,14(2):17-20.
- [16] 汪云甲. 论矿区资源绿色开发的资源科学基础[J]. 资源科学,2005,27(1):14-19.
- WANG Yun-jia. On the green exploitation of natural resources in mining areas of China[J]. Resources Science, 2005,27(1):14-19.
- [17] 谭海樵. 面向煤矿绿色开采的集成信息系统[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(2):209-212.
- TAN Hai-qiao. Green-mining-oriented integrated information system[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004,33(2):209-212.
- [18] 高井祥,王坚. 绿色开采中的测绘保障措施[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(2):224-228.
- GAO Jing-xiang, WANG Jian. Security measures for surveying and mapping in green mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004,33(2):224-228.
- [19] 张爱敏,丁在宇,罗振丽. 三维地震在绿色开采中的作用和发展[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(2):229-232.
- ZHANG Ai-min, DING Zai-yu, LUO Zhen-li. Application and development of 3D seismic technology in green mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004,33(2):229-232.
- [20] 刘金平,张幼蒂,杨会俊. 绿色开采的矿产资源价值[J]. 中国矿业大学学报,2004,33(2):233-236.
- LIU Jin-ping, ZHANG You-di, YANG Hui-jun. Value of green mining in mineral resources [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004,33(2):233-236.
- [21] QIAN Ming-gao. A study of the behaviour of over-

- lying strata in longwall mining and its application to strata control [C]// Proceedings of the Symposium on Strata Mechanics. [S. l.]: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982:13-17.
- [22] 钱鸣高,李鸿昌. 采场上覆岩层活动规律及其对矿山压力的影响[J]. 煤炭学报,1982,7(2):1-12.  
QIAN Ming-gao, LI Hong-chang. The movement of overlying strata in longwall mining and its effect on ground pressure[J]. Journal of China Coal Society, 1982, 7(2):1-12.
- [23] 钱鸣高, 缪协兴. 采场上覆岩层结构的形态与受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2):97-106.  
QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing. Theoretical analysis on the structural form and stability of overlying strata in longwall mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(2):97-106.
- [24] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3):225-230.  
QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing, XU Jia-lin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(3):225-230.
- [25] 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.
- [26] 缪协兴, 钱鸣高. 采动岩体的关键层理论研究新进展[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1):25-29.  
MIAO Xie-xing, QIAN Ming-gao. Advance in key strata theory of mining rockmass [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1):25-29.
- [27] 缪协兴, 刘卫群, 陈占清. 采动岩体渗流理论[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [28] 李顺才, 陈占清, 缪协兴, 等. 破碎岩体中气体渗流的非线性动力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7):1372-1380.  
LI Shun-cai, CHEN Zhan-qing, MIAO Xie-xing, et al. Nonlinear dynamic study on gas flow in broken rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7):1372-1380.
- [29] 刘卫群, 缪协兴, 余为, 等. 破碎岩石气体渗透性的试验测定方法[J]. 实验力学, 2006, 21(3):399-402.  
LIU Wei-qun, MIAO Xie-xing, YU Wei, et al. A testing method for determining the gas permeability of overbroken rocks [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(3):399-402.
- [30] 黄先伍, 唐平, 缪协兴, 等. 破碎砂岩渗透特性与孔隙率关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9):1385-1388.  
HUANG Xian-wu, TANG Ping, MIAO Xie-Xing, et al. Testing study on seepage properties of broken sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9):1385-1388.
- [31] 陈占清, 缪协兴, 刘卫群. 采动围岩中参变渗流系统的稳定性分析[J]. 中南大学学报, 2004, 35(1):129-132.  
CHEN Zhan-qing, MIAO Xie-xing, LIU Wei-qun. Analysis on stability of parametric system of seepage flow in wall rock affected by mining [J]. Journal of Central South University, 2004, 35(1):129-132.
- [32] 缪协兴, 陈占清, 茅献彪, 等. 峰后岩石非 Darcy 渗流的分岔行为研究[J]. 力学学报, 2003, 35(6):660-667.  
MIAO Xie-xing, CHEN Zhan-qing, MAO Xian-biao, et al. The bifurcation of non-darcy flow in post-failure rock [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2003, 35(6):660-667.
- [33] 缪协兴. 采动岩体的流变与控制技术[J]. 力学与实践, 2001, 23(3):7-12.  
MIAO Xie-xing. Rheological phenomena and control technology of mining strata [J]. Mechanics and Engineering, 2001, 23(3):7-12.
- [34] THOMAS J L, ANDERSON R L. Water-energy conflicts in montana 's yellowstone river basin, southeastern montana [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1976, 12(4):829-842.
- [35] HICKCOX D H. Water rights, allocation, and conflicts in the tongue river basin, southeastern montana [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1980, 16(5):797-803.
- [36] PLOTKIN S E, GOLD H, WHITE I L. Water and energy in the western coal lands [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1979, 15(1):94-107.