

# 我国水体下保水采煤技术研究进展

鞠金峰<sup>1,2</sup>, 许家林<sup>3,4</sup>, 李全生<sup>5,6</sup>, 朱卫兵<sup>3,4</sup>, 王晓振<sup>3,4</sup>

(1. 中国矿业大学 物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008; 2. 矿山互联网应用技术国家地方联合工程实验室, 江苏 徐州 221008;  
3. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 4. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116;  
5. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 100011; 6. 神华集团有限责任公司 科技发展部, 北京 100011)

**摘要:**针对我国水体下保水采煤的理论与实践,就采动覆岩导水裂隙演化规律,以及在此基础上形成的保水采煤技术研究进展进行了综述和展望。结果表明:导水裂隙作为地层含水层破坏与地下水漏失的主要根源,其动态发育与发展直接受控于覆岩关键层的破断运动;因而,可按具体开采条件下覆岩关键层的赋存情况进行导水裂隙带高度的确定,从而科学指导水体下保水采煤对策的制定。依据水体下保水采煤所包括的 4 个层次的内涵,分别从顶板突水灾害防治、含水层原位保护、采动破坏含水层的再恢复、采动漏失水资源的转移储存与利用等 4 个方面,进行了相关保水采煤技术研究进展的论述,在此基础上提出了今后的研究方向。

**关键词:**绿色开采;保水采煤;导水裂隙带;顶板含水层;关键层

**中图分类号:**TD823 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2018)01-0012-08

## Progress of water-preserved coal mining under water in China

JU Jinfeng<sup>1,2</sup>, XU Jialin<sup>3,4</sup>, LI Quansheng<sup>5,6</sup>, ZHU Weibing<sup>3,4</sup>, WANG Xiaozhen<sup>3,4</sup>

(1. IoT / Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. The National and Local Joint Engineering Laboratory of Internet Application Technology on Mine, Xuzhou 221008, China;

3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Xuzhou 221116, China; 4. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 5. State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 100011, China; 6. Department of Scientific Development, Shenhua Group Corporation Ltd., Beijing 100011, China)

**Abstract:** According to the theories and practices in water-preserved coal mining under water in China, research progress on the evolution law of mining-induced water conducted zone in overburden and on the basis of which the water-preserved mining countermeasures or solutions formatted has been summarized in the paper, as well as the outlooks. The research indicate that the destruction of the underground aquifer and groundwater loss have are rooted in the mining-induced fracture. The dynamic development of the fracture is controlled by the breaking movement of the key strata (KS). In this aspect, the height of the water-flowing fractured zone can be determined by the occurrence of KS in overburden under the specific mining condition. Accordingly, the water-preserved mining methods can be draw up scientifically. In terms of the four levels of connotation, the progress of water-preserved mining technology has been summarized in four aspects: prevention of water inrush disaster in roof, in-situ protection of underground aquifer, regeneration of the mining-destroyed aquifer, and the storage of the mining-lost groundwater and its recycle utilization. Based on the above, three main projects that should be studied in future have been summarized.

**Key words:** green mining; water-preserved mining; water conducted zone; roof aquifer; key strata

收稿日期: 2017-10-24; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2018.01.002

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501104); 国家自然科学基金资助项目(51604259); 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金资助项目(SHJT-16-30.2)

作者简介: 鞠金峰(1986—), 男, 江苏如皋人, 副研究员, 博士。Tel: 13776583410, E-mail: jjfcumt@163.com

引用格式: 鞠金峰, 许家林, 李全生, 等. 我国水体下保水采煤技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 12-19.

JU Jinfeng, XU Jialin, LI Quansheng, et al. Progress of water-preserved coal mining under water in China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 12-19.

## 0 引言

煤炭资源开发易引发一系列采动损害和环境破坏问题,危及社会公共安全和自然生态;为此,钱鸣高院士<sup>[1]</sup>提出了煤矿绿色开采的理念,建立了以保水开采、充填减沉开采、煤与瓦斯共采等3大技术为主的技术框架,为我国煤炭资源的安全、绿色开发奠定了重要基础。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,煤层开采对上部水体的扰动不可避免,轻者会改变上部水体的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,水体下的保水采煤应包括下列4个层次的内涵<sup>[2]</sup>:①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<sup>[2-4]</sup>;②采取技术措施减少或避免采煤对上部水体的破坏,保护地下水资源<sup>[5-6]</sup>;③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<sup>[7-8]</sup>;④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”。长期以来,我国广大煤矿科技人员一直致力于水体下保水采煤相关理论、技术、以及工程实践的研究,基于顶板水体富水特征评价及采动覆岩破坏与导水裂隙发育规律研究,建立了水体下保水采煤的技术体系,为我国水体下的保水采煤实践提供了良好的技术基础<sup>[9-11]</sup>。

从我国主要煤矿区的水文地质赋存特征看<sup>[5]</sup>,目前水体下的保水采煤主要存在2方面的难点:其一,华北、华南矿区一些水文地质条件复杂、富水性较强矿井的顶板水害防治难题,特殊条件下还会出现异常的突水与压架并发的事故。如,安徽皖北、淮南等矿区发生的厚层松散承压含水层下开采的突水压架事故<sup>[12-13]</sup>,以及陕西彬长矿区巨厚洛河组含水层下开采常易出现的离层区积水引发的突水压架事故<sup>[14-15]</sup>等;研究掌握此类开采条件下覆岩特殊的破断运动特征与导水裂隙发育规律是解决这一难题的关键。其二,西北矿区丰富煤炭资源开发与极度匮乏水资源保护利用之间的矛盾问题。由于该区域煤层赋存厚度大、层数多,但埋深普遍较浅,采动引起的含水层破坏与地下水流失往往难以避免,从限制

采煤角度来保护地下水资源目前难以实现;实施人工干预措施促进含水层生态恢复或对采动漏失水资源进行转移储存和再利用是解决这一难题的有效途径。

针对上述保水采煤难题,已有不少学者开展了研究,一定程度上解决了相关矿井安全开采与水资源保护协调的难题<sup>[8-10,12]</sup>,但尚存在一些亟需研究和突破的技术瓶颈。笔者在充分总结前人研究成果的基础上,对我国水体下保水采煤的相关理论与技术研究进展、以及有待进一步研究的问题进行综述和展望,从而为煤矿保水开采研究与实践提供参考。

## 1 采动覆岩导水裂隙演化规律

煤炭地下开采将引起上覆岩层的移动与破坏,从而在覆岩中形成导水裂隙;覆岩导水裂隙产生既为上部水体流失提供了通道,同时也成为地表生态退化的地质根源。因此,研究揭示覆岩采动破坏后导水裂隙发育、发展的动态演变规律是评价覆岩含水层水漏失程度、确定水体下保水采煤对策的重要理论依据。为此,许多研究学者对此进行了研究<sup>[1-7]</sup>,其主要涵盖开采参数与地质赋存对导水裂隙动态发育的影响、导水裂隙带高度的探测和预计等方面。

### 1.1 覆岩导水裂隙动态发育规律

覆岩中的导水裂隙是在岩层张拉破坏或受压屈服后产生的,其动态发育过程与采动岩层的破断运动密切相关。为此,许家林等<sup>[5,16-21]</sup>基于岩层控制的关键层理论,对采动覆岩导水裂隙的动态发育规律开展了较为系统的研究。

研究发现,煤层开采过程中,覆岩导水裂隙的发育高度随关键层的破断运动而呈台阶跳跃上升规律;仅当关键层的破断裂隙上下贯通而导水时,其所控制的岩层才产生贯通裂隙而导水,相应导水裂隙带高度跃升至上部邻近关键层底界面。如图1所示,当工作面推进至60 m时,亚关键层1发生初次破断,导水裂隙发育至亚关键层2底部;由于亚关键层2没有破断,尽管工作面继续回采,导水裂隙发育高度并没有增大,出现了图1中的“台阶”平台。当工作面继续推进至80 m时,亚关键层2发生初次破断,导水裂隙直接发育至亚关键层3底部。随着工作面继续推进,亚关键层3破断前,导水裂隙发育高度保持不变。直至工作面推进至120 m时,亚关键层3发生初次破断,但由于亚关键层3的破断裂缝

没有贯通,导水裂隙发育高度没有增加,仍保持在亚关键层3底界面以下。所以,当覆岩中关键层位置改变时,导水裂隙的发育情况也将有所不同。由此可见,覆岩导水裂隙的发育范围不仅与煤层采高等开采参数有关,还与覆岩关键层赋存密切相关。

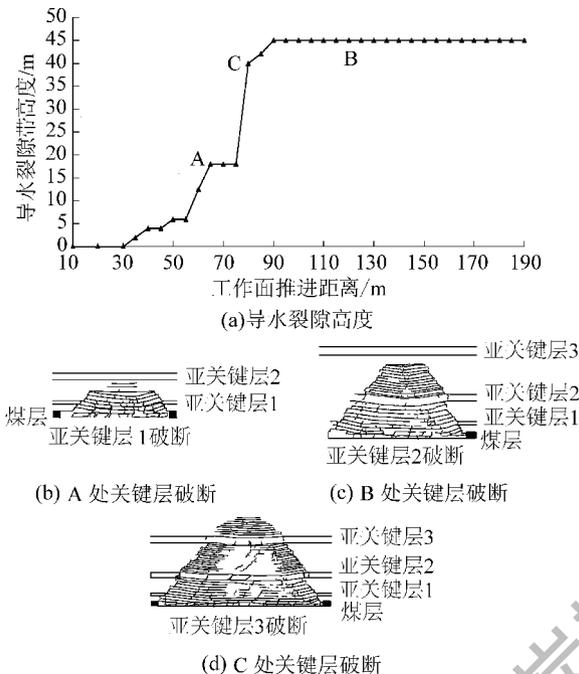


图1 导水裂隙发育高度随关键层破断的动态变化过程<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Dynamic variation of the height of water conducted zone as the KS breaking<sup>[7]</sup>

在覆岩关键层产生破断、回转、反向回转直至稳定的过程中,导水裂隙将经历“产生-发育-闭合”的动态过程<sup>[20]</sup>。若关键层破断结构在此运动过程中能稳定铰接,则裂隙易闭合;而若关键层破断结构发生滑落失稳,则导水裂隙长期存在。所以,受采动覆岩中不同区域关键层破断结构形态及其稳定性的影响,不同区域导水裂隙的发育形态及其开度将有所不同,从而造成覆岩导水裂隙带范围不同的渗透率分布。

## 1.2 覆岩导水裂隙带高度确定

覆岩导水裂隙带高度是导水裂隙演化规律研究中最重要参数,该值的确定对于准确评价覆岩含水层受采动破坏程度、科学制定保水采煤对策等都具有重要指导意义。目前,对于导水裂隙带高度的获取最为可靠的是利用地面钻孔进行工程探测的方法,主要通过钻孔钻进过程中冲洗液漏失量变化、以及掉钻、卡钻的位置等信息进行判断<sup>[4,21]</sup>。然而,该方法又存在实施成本高、测点密度稀等缺点。因此,研究适用于具体开采条件的导水裂隙带高度理

论预计或判别方法显得尤为重要。

目前,我国应用最为普遍的导水裂隙带高度预计方法是《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》(以下简称《规程》)中推荐的统计经验公式<sup>[4]</sup>,是刘天泉院士在大量实测数据统计基础上得到的经验公式,一定程度上满足了我国煤矿水体下保水采煤设计的要求。它将覆岩岩性分类为坚硬、中硬、软弱、极软弱等类型,分别采用不同的统计经验公式(仅含煤层采厚参数)进行导水裂隙带高度的预计。由于覆岩岩性的分类是将所有不同岩性岩层进行强度和厚度的加权平均后获得,属于数学均化的思路;因此,该经验公式掩盖了关键层在覆岩破断运动中的控制作用,从而导致在某些特定开采条件下的预计结果与实际偏差较大,甚至发生突水事故<sup>[22-24]</sup>。

为此,许家林等<sup>[7,18]</sup>结合覆岩关键层运动对导水裂隙演化的影响规律,提出了“基于关键层位置的导水裂隙带高度预计新方法”。其具体判别流程为:根据地质勘探得到的具体覆岩柱状,采用关键层判别软件 KSPB<sup>[16-17]</sup>进行覆岩关键层位置的判别,然后从开采煤层顶界面开始判断覆岩7~10倍采高范围外是否存在关键层;若存在,则导水裂隙带高度为7~10倍采高范围外第1层关键层底界面至煤层间的距离;若不存在,则导水裂隙带高度将大于或等于基岩厚度。该预计方法的可靠性也得到了现场多个工程案例的验证<sup>[7]</sup>。也有学者<sup>[25-26]</sup>通过室内模拟试验对覆岩导水裂隙带高度的影响因素及其影响规律进行了研究,并推导得出了导水裂隙带高度计算的拟合公式。但这类方法往往不能适应复杂多变的煤层覆岩赋存条件,导致实际工程应用时误差较大。

## 2 水体下保水采煤技术发展现状

长期以来,我国多数矿井在水体下采煤时往往只重视水害防治,忽视了对上覆水体的保护。自“绿色开采”和“保水采煤”的理念提出以来,许多煤炭企业越来越重视煤炭开采过程中的水资源保护与利用,由此促进了我国水体下保水采煤技术的发展。下面将按照前述引言中所述保水采煤的4个层次内涵,对近年来我国水体下保水采煤技术的研究进展进行梳理和总结。

### 2.1 顶板突水灾害防治

水体下保水采煤的第一要务是要保证安全开采,即是要防止顶板突水灾害的发生,这也是我国煤

矿水体下采煤实践中着重关注的内容。顶板突水是指顶板涌水量增大到一定程度,超出矿井或回采面的排水能力而引起重大损失的灾害性事故。因此,其灾害发生需满足2点先决条件<sup>[6]</sup>:一是采动裂隙通道沟通上覆含水层,或导水裂隙与含水层之间无有效隔水层,二是含水层的富水性和渗透性较高。所以,防治顶板突水灾害关键在于上覆水体富水特性评价以及导水裂隙发育高度确定。为此,武强院士<sup>[6]</sup>提出了解决顶板涌(突)水条件定量评价的“三图-双预测法”,将煤层回采顶板冒落安全性分析和顶板直接充水含水层富水性分析作为顶板涌(突)水危险性分区的重要依据,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>[27]</sup>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。基于此,其他许多学者开展了水体下合理开采上限确定以及防水安全煤岩柱留设等问题的研究<sup>[3-4,28-31]</sup>。上述研究成果成功指导了我国华东、华北、西北等地许多煤矿水体下的安全采煤实践,取得了显著成效。

现场工程实践中还发现,在某些特殊的开采条件下,会发生导水裂隙带高度异常增大引起突水灾害的现象,造成前述的相关研究成果难以适用。下面就以2类典型突水事故案例进行介绍和说明。

1) 松散承压含水层下采煤引发的突水事故。我国华东、华北许多矿区的煤系地层普遍被第四系巨厚松散层覆盖,该松散层底部存在着一层以非胶结沙土、砂砾、砾石为骨架的承压含水层,直接赋存于基岩顶部,水压高达3~4 MPa,对煤矿的安全开采造成了严重威胁。以皖北煤电祁东煤矿为例<sup>[12]</sup>,自2002年投产以来,先后在3<sub>2</sub>22、7<sub>1</sub>14、6<sub>1</sub>30等8个综采工作面发生了17次突水压架事故,其中矿井投产后的3<sub>2</sub>22首采工作面推进仅42 m时,发生压架,立柱卡环压裂,最大突水量达1 520 m<sup>3</sup>/h,仅1 d便导致矿井被淹,造成直接经济损失3 648余万元,被淹矿井恢复生产费用近1亿元。

研究发现<sup>[12-13,32]</sup>,此类顶板突水灾害与工作面压架灾害伴生出现,说明它与采动覆岩破断运动特征紧密相关,预示了松散承压含水层下采煤覆岩破断规律的特殊性。由于松散承压含水层的流动性和侧向补给作用,煤层开挖过程中作用于基岩顶界面的上覆载荷不像通常条件下随煤层开挖显著降低而

是基本保持恒定,松散承压含水层起到了载荷传递的作用,导致其下部基岩内关键层发生复合破断,造成其“砌体梁”结构的滑落失稳,由此引起导水裂隙直接发育至松散承压含水层,引发工作面突水压架。基于上述突水机理分析,研究形成了依据覆岩关键层是否发生复合破断划分突水危险区的预测方法,提出了关键层超前预裂爆破改性的防治对策,科学指导了皖北等矿区松散承压含水层下的安全采煤实践<sup>[12,33]</sup>。

2) 覆岩离层区突水引起的突水事故。淮北矿区海孜煤矿主采7号煤层,其上覆顶板存在一层厚度达96~169 m、平均厚度为120 m的巨厚火成岩。正因为如此,发生了该巨厚火成岩下离层区积水引发的突水压架事故,事故发生时20 min内涌水量达3 887 m<sup>3</sup><sup>[14]</sup>。陕西彬长矿区的崔木、郭家河等煤矿在上覆巨厚洛河组含水层下开采时,也发生了类似的突水压架事故<sup>[15]</sup>,严重影响矿井安全高效生产。

研究发现<sup>[14]</sup>,在采动覆岩导水裂隙不沟通含水层的条件下,若覆岩离层区与上覆含水层存在一定的水力联系,则离层区易受含水层补给而积水。如此,随着离层区上覆厚硬岩层的弯曲下沉,上覆载荷将通过离层区水包传递至下部岩层,产生类似于上述松散承压含水层传递水压引起的关键层复合破断,导致岩层破断结构的滑落失稳,引起离层区积水瞬间涌至工作面,引发突水压架。由此研究形成了利用井下钻孔或地面直通孔疏放离层区积水的水害防治对策,在相关矿区得到成功应用<sup>[13]</sup>。

## 2.2 含水层原位保护

前述顶板水害防治主要是从安全开采角度,以减小采动过程中的顶板涌水量为主要目标进行实施,很少涉及上覆水体的保护(有时甚至会对上覆含水层进行人为破坏,以提前疏放水体)。所谓含水层的原位保护,即是通过控制煤层开采引起的上覆岩层破坏程度,避免导水裂隙沟通含水层,保护地下水资源。所以,依据开采煤层的水文地质赋存条件,合理控制导水裂隙带顶界面与地层含水层所处层位的相对位置,是实现含水层原位保护的重要途径。王双明等<sup>[8]</sup>、范立民等<sup>[9]</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>[11]</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。

目前,已有的普遍做法是通过降低导水裂隙带的发育高度来避免含水层的破坏,主要采用限高、充填、条带、短壁或房柱等开采方式进行<sup>[34-38]</sup>。这类方法一定程度上满足了煤炭资源储量相对较少、开采强度相对较低矿区的含水层原位保护要求,但对于诸如晋、陕、蒙等煤炭资源富集地,上述方法难以适应这些地区高强度开采的现状,含水层原位保护与煤炭资源大规模开发之间的矛盾难以调和。所以,对于上覆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显得尤为重要。

### 2.3 采动破坏含水层的再恢复

含水层受采动破坏后将引起地下水位下降,从而影响地表植被取水和区域水系循环。若能采取相应措施将破坏含水层的裂隙通道封堵上,将能对含水层的生态恢复起到积极的促进作用。在准确判断了覆岩导水裂隙的分布区域后,将水泥、黏土或其他黏结性材料注入到导通含水层的裂隙通道中,阻隔含水层的水漏失通道,实现含水层的再恢复。

由前述第1节导水裂隙演化规律的研究结果可知,受煤层开采参数与顶板岩层赋存等因素变化的影响,不同开采区域的覆岩导水裂隙发育状态并非完全一致,上覆含水层也并非在某一工作面(或采区)的所有开采范围都被裂隙破坏,含水层常在开采范围的局部区域出现破坏。因此,依据不同开采区域覆岩关键层的具体赋存条件,准确辨识受采动破坏含水层的分布区域,是确保该保水采煤对策高效实施的重要依据。同时,在覆岩“马鞍形”导水裂隙带范围内,不同区域的裂隙导水能力也存在较大差别。处于开采边界的张拉裂隙其导水能力明显高于采区中部压实区的闭合裂隙。因此,着重对开采边界区域的“导水主通道”进行注浆封堵势必能取得明显的实施效果(图2)<sup>[39]</sup>。

已有研究发现<sup>[2,40]</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<sup>2</sup>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

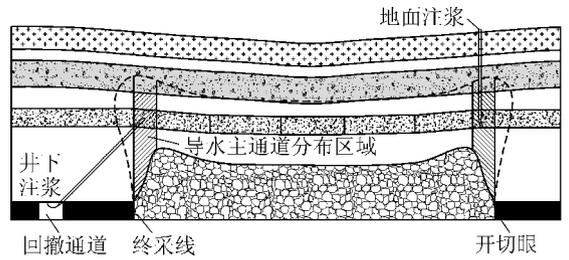


图2 注浆封堵顶板导水主通道的保水示意

Fig. 2 Schematic diagram of water-preserved mining by grouting and sealing the main channel of roof

内水位又出现逐步恢复的现象,如图3所示。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。

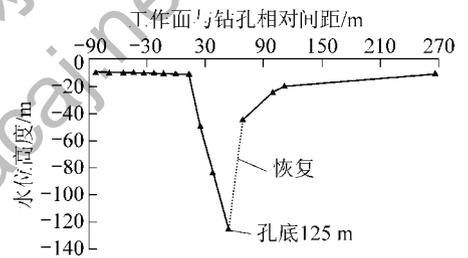


图3 补连塔煤矿12401工作面水文观测孔水位变化曲线<sup>[2]</sup>

Fig. 3 Curve of water level at the hydrologic observation borehole in No. 12401 mining face of Bulianta Mine

### 2.4 采动漏失水资源的转移储存与利用

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利用,一定程度上可实现“煤水共采”。

目前,在矿井水资源转移储存与利用方面做得较好的当属神华神东矿区。经过20多年的研究与实践,研发形成了煤矿地下水的水资源循环利用技术体系<sup>[10,41-43]</sup>,即利用井下采空区作为水资源储存和净化的空间,以开采引起的覆岩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,实现煤炭开采水资源的有效保护与循环利用。目前该技术已在神东等西部缺水矿区得到推广使用,构建了35座煤矿地下水水库,供应了矿区95%以上用水量,为西部缺水矿区的保水采煤提供了新的技术途径。然而受矿井水文地质及开采参数等诸多因素的影响,并非所有矿井都适合采

用地下水库保水技术;采动覆岩导水裂隙作为地下水库水源补给的重要通道,是影响地下水库适应性的核心因素,由此文献[42]研究形成了基于导水裂隙带高度的地下水库适应性评价方法,有效指导了西部缺水矿区构建地下水库的科学选址。

此外,由矿井排出的采动漏失水资源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<sup>[44]</sup>。虽然目前我国在这方面研究和应用较少,但国外已有不少学者开展了研究<sup>[45]</sup>,主要采用钻井灌注和沟渠(或水池)入渗的方式将水资源重新注入地表松散含水层中。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。

### 3 存在的问题与研究方向

目前我国水体下保水采煤技术已在基础理论和工程实践上取得了快速的发展,为我国煤炭资源的安全、绿色开发作出了重要贡献。然而,受煤炭赋存条件复杂多变、高强度开采等因素的影响,我国水体下保水采煤技术仍存在问题有待进一步的研究。

1) 研究地下水通过非导水裂隙带岩层向下部采空区越层渗流的规律。保水采煤实践中多数是按照导水裂隙带沟通含水层来界定地下水的漏失,而现场工程实践中常发现,在导水裂隙带未沟通含水层条件下,当含水层水压或其两者之间的间隔层厚度满足一定条件时,含水层水体也会穿越间隔层而渗流至采空区。因此,研究揭示此类越层渗流现象的机理和规律对于准确判断地层含水层受采动破坏程度及其生态恢复能力具有重要意义。

2) 研究采动破坏岩体裂隙的水渗流规律。目前有关裂隙岩体的渗流特性研究多集中于瓦斯渗流特性的研究,有关水渗流特性的研究相对较少。处于导水裂隙带范围的破坏岩体长期受到采动应力和水化学作用的双重影响,导致其水渗透性分布在“时-空”上发生演变。同时,目前普遍使用的用于工作面涌水量预测的“大井法”存在过于简化的缺点,未能客观体现采动裂隙分布特征及渗流规律。因此,研究此问题对于科学形成基于采动裂隙演化规律的涌水量预计方法、判断岩层采动导水裂隙的自然弥合自修复能力都具有重要的指导作用。

3) 需要研究与含水层再恢复、水资源转移储存与利用相关人工干预措施的工艺与配套技术。前面

论述中无论是对导水裂隙主通道进行注浆封堵,还是将采动漏失水资源回灌入地表松散层,都仅处于概念层面,距离形成完整的技术措施还有很大差距。以导水裂隙主通道的注浆封堵为例,与其相关的注浆材料选配、注浆时机确定、钻孔空间布置等都是需要深入研究的问题。

### 4 结 语

我国煤炭行业发展经历了由“粗放开采”到“绿色开采”再到“科学开采”的艰难历程,一定程度上也映射了保水采煤技术的发展历程。50多年来,我国在水体下保水采煤方面进行了大量的理论研究和工程实践,编制和修订了相关规程,极大促进了我国保水采煤技术的发展,但仍有不少需要进一步研究的问题。合理遵循采动覆岩导水裂隙由发育发展到闭合的动态演变过程及规律,是科学制定保水采煤对策的关键;保水采煤的实施应在充分保证安全开采的前提下,对上覆受扰动含水层进行原位保护或促进再恢复,并将采动漏失或人为疏放的水资源转移至其它适合空间进行储存再利用,一定程度上实现“煤水共采”。

笔者仅针对我国水体下保水采煤技术的进展进行了综述和展望,对于底板承压水上的保水采煤技术进展尚未涉及。无论是水体下还是底板承压水上的保水采煤,其实施所需遵循的基本原则是一致的,岩层采动裂隙演化及其渗流规律研究始终是保水采煤技术的重要理论基础。

#### 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] 许家林.煤矿绿色开采[M].徐州:中国矿业大学出版社,2011.
- [3] 刘天泉.厚松散含水层下近松散层的安全开采[J].煤炭科学技术,1986,14(3):14-18.  
LIU Tianquan. Safe extraction of near soft layer underlying a thick and soft water bearing layer[J]. Coal Science and Technology, 1986, 14(3): 14-18.
- [4] 国家煤炭工业局.建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M].北京:煤炭工业出版社,2017.
- [5] 武强,赵苏启,孙文洁,等.中国煤矿水文地质类型划分与特征分析[J].煤炭学报,2013,38(6):901-905.  
WU Qiang, ZHAO Suqi, SUN Wenjie, et al. Classification of the

- hydrogeological type of coal mine and analysis of its characteristics in China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38 (6):901-905.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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 Dexiong, 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.
- [10] 顾大钊.煤矿地下水库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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等.岩层控制的关键层理论[M].徐州:中国煤炭出版社,2003.
- [17] 许家林,钱鸣高.覆岩关键层位置的判别方法[J].*中国矿业大学学报*,2000,29(5):463-467.  
XU Jialin, QIAN Minggao. Method to distinguish key strata in overburden [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2000, 29 (5): 463-467.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 王晓振,许家林,朱卫兵.主关键层结构稳定性对导水裂隙演化的影响研究[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.
- [21] 高保彬,刘云鹏,潘家宇,等.水体下采煤中导水裂隙带高度的探测与分析[J].*岩石力学与工程学报*,2014,33(1):3384-3390.  
GAO Baobin, LIU Yunpeng, PAN Jiayu, *et al.* Detection and analysis of water flowing fracture zone in underwater mining [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33 (1): 3384-3390.
- [22] 杨本水,王从书,阎昌眼.祁东煤矿突水灾害成因分析[J].*煤田地质与勘探*,2003,31(1):41-43.  
YANG Benshui, WANG Congshu, YAN Changyan. Causes of water in-rush in Qidong Coal Mine [J]. *Journal of Coal Geology & Exploration*, 2003, 31 (1): 41-43.
- [23] 檀双英,吴劲松.祁东煤矿7<sub>1</sub>煤层7<sub>14</sub>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 7<sub>14</sub> mining face of 7<sub>1</sub> coal seam in Qidong Colliery [J]. *Coal Mining Technology*, 2006, 11 (3): 64-67.
- [24] 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.
- [25] 孙亚军,徐智敏,董青红.小浪底水库下采煤导水裂隙发育监测与模拟研究[J].*岩石力学与工程学报*,2009,28(2):238-245.  
SUN Yajun, XU Zhimin, DONG Qinghong. Monitoring and simulation research on development of water flowing fracture for coal mining under Xiaolangdi reservoir [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28 (2): 238-245.
- [26] 张杰,侯忠杰.浅埋煤层导水裂隙发展规律物理模拟分析[J].*矿山压力与顶板管理*,2004,21(4):32-34.

- ZHANG Jie, HOU Zhongjie. The simulation experiment analysis of water fluid crack's development law in the shallow coal seam[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2004, 21(4): 32-34.
- [27] 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.
- [28] 许光泉. 松散含水水体下合理安全煤柱高度留设回顾与探讨[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(10): 41-44.
- XU Guangquan. Review and discussion on rational height of safety coal and rock pillars under soft water bearing strata[J]. Coal Science and Technology, 2003, 31(10): 41-44.
- [29] 许延春. 综放开采防水煤岩柱保护层的“有效隔水厚度”留设方法[J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 306-308.
- XU Yanchun. Design methods of the effective water-resisting thickness for the protective seam of the water barrier in fully-caving mechanized coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 306-308.
- [30] 涂敏, 桂和荣. 厚松散层及超薄覆层厚煤层防水煤柱开采试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3494-3497.
- TU Min, GUI Herong. Testing study on mining of waterproof coal pillars in thick loose bed and thick coal seam under ultrathin overlying strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3494-3497.
- [31] 杨本水, 王从书, 阎昌银. 中等含水层下留设防砂煤柱开采的试验与研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 343-346.
- YANG Benshui, WANG Congshu, YAN Changyin. Study and trial on exploitation of retaining safety coal pillar against sand under medium-thickness aquifer layer[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 343-346.
- [32] 许家林, 陈稼轩, 蒋坤. 松散承压含水层的载荷传递作用对关键层复合破断的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 699-704.
- XU Jialin, CHEN Jiakuan, JIANG Kun. Effect of load transfer of unconsolidated confined aquifer on compound breakage of key strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 699-704.
- [33] WANG Xiaozhen, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Roof pre-blasting to prevent support crushing and water inrush accidents[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(3): 379-384.
- [34] 康永华. 采煤方法变革对导水裂隙带发育规律的影响[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.
- [35] 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 Jianguo, 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.
- [36] 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.
- [37] 刘玉德, 闫守峰, 刘东升. 浅埋薄基岩煤层短壁连采模式及应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 12(6): 51-56.
- LIU Yude, YAN Shoufeng, LIU Dongsheng. Study on the pattern and the application of short-wall continuous mechanical mining in shallow coal seam with thin bedrock[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 12(6): 51-56.
- [38] 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.
- [39] 鞠金峰, 许家林. 一种钻孔注浆封堵覆岩导水裂隙主通道的水害防治方法[P]. 中国: 201710479391.3, 2017-06-22.
- [40] 黄庆享, 蔚保宁, 张文忠. 浅埋煤层黏土隔水层下行裂隙弥合研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(1): 35-39.
- HUANG Qingheng, WEI Baoning, ZHANG Wenzhong. Study of downward crack closing of clay aquiclude in shallowly buried coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(1): 35-39.
- [41] 陈苏社, 鞠金峰. 大柳塔煤矿矿井水资源化利用技术[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(2): 125-128.
- CHEN Sushe, JU Jinfeng. Utilization technology of mine water resources in Daliuta Mine[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(2): 125-128.
- [42] 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.
- [43] 鞠金峰, 许家林, 朱卫兵. 西部缺水矿区地下水保水的库容研究[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.
- [44] 鞠金峰, 许家林. 一种井下漏失水资源回灌地表松散层的保水方法[P]. 中国: 201710479414.0, 2017-06-22.
- [45] PETER Dillon. Future management of aquifer recharge[J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13: 313-316.