

综述与专论

我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展

顾大钊^{1,2} 张 勇^{1,2} 曹志国^{1,2}

(1. 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室, 北京 100011; 2. 神华集团有限责任公司 科技发展部, 北京 100011)

摘 要: 水资源短缺是全球性问题, 我国是全球最缺水的国家之一。煤炭资源与水资源的逆向分布使得我国煤炭开采水资源保护利用成为煤炭绿色开发的重大技术难题。我国西部已成为煤炭的主产区, 但该地区生态环境脆弱, 水资源蒸发量大, 矿井水外排后蒸发损失是我国目前煤炭开采年损失 60 亿 t 矿井水的主要原因。系统分析了煤炭开采水资源保护利用的技术进展及工程应用特点; 介绍了神华集团经过近 20 年的技术探索和工程实践, 突破传统理念, 首次提出采空区储用矿井水的技术构想, 攻克了水源预测、水库选址、库容计算、坝体构筑、安全控制和水质保障等技术难题, 构建了煤矿地下水库技术体系。该技术已在神东矿区全面实施, 并将在西部其他矿区推广应用, 为煤炭开采水资源保护利用开辟了有效的技术途径。

关键词: 煤炭开采; 水资源保护利用; 采空区储用矿井水; 煤矿地下水库

中图分类号: TV623; TD74

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)01-0001-07

Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China

Gu Dazhao^{1,2}, Zhang Yong^{1,2}, Cao Zhiguo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Groundwater Protection and Utilization by Coal Mining, Beijing 100011, China;

2. Technology Development Department, Shenhua Group Corporation Limited, Beijing 100011, China)

Abstract: Water shortage is a global problem. China is one of the most shortage countries in the world. The distribution of coal resource is reverse to water resource, which makes protection and utilization of water resource become more important. Western China has become major coal producing areas in where ecological environment is fragile and evaporation is quite large. The discharged mine water evaporation is major reason for loss of 6 billion tons water per year in China. The recent techniques and engineering applications on protection and utilization of water resource by coal mining are summarized and analyzed, and coal mine underground reservoir is firstly proposed by Shenhua Group Corporation Limited based on the breakthrough technological concept of mine water storage and utilization in goaf, and some technical problems including water resource prediction, reservoir site selection, reservoir capacity design, dam construction, safety guarantee, water quality control are solved in almost 20 years of technical exploration and engineering practice. Lastly, the whole theory framework and technological system is established. The coal mine underground reservoir has been applied in Shendong Mining Area and is popularizing to other mining areas in the western China. The technique is a effective way to the protection and utilization of underground water resource by coal mining.

Key words: coal mining; protection and utilization of water resource; mine water storage and utilization in goaf; coal mine underground reservoir

1 问题的提出

我国是全球最大的煤炭生产和消费国, 2014 年

煤炭生产和消费分别占全球的 46.9% 和 50.6%^[1]; 煤炭在我国一次能源生产与消费中长期占 70% 左右(图 1), 煤炭在我国主体能源地位较长时期内

收稿日期: 2015-11-20; 责任编辑: 杨正凯 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.01.001

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAC10B03)

作者简介: 顾大钊(1958—), 男, 江苏盐城人, 中国工程院院士。Tel: 010-58133053, E-mail: gudz@shenhua.cc

引用格式: 顾大钊, 张 勇, 曹志国. 我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 1-7.

Gu Dazhao, Zhang Yong, Cao Zhiguo. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 1-7.

不会发生改变,安全和绿色已成为当前煤炭开采的主题。目前,我国煤炭安全形势趋好,煤炭百万吨死亡率已经由2000年的5.77降低至2014年的0.257(图2)。我国煤炭开采效率已达世界先进水平,在煤机装备、煤炭开采工艺方面全球领先。全球95%以上的千万吨矿井都在中国。

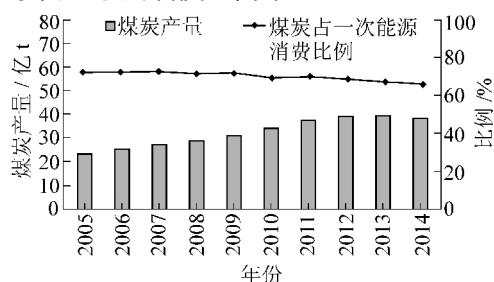


图 我国煤炭历年产量及占一次能源消费量比例

Fig. 1 Production of coal and its percentage with primary energy consumption in China

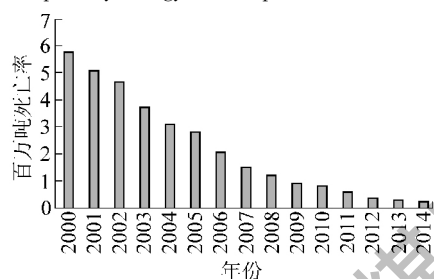


图2 2000—2014年我国煤炭百万吨死亡率变化

Fig. 2 Million tons death rate of coal mine in 2000—2014

绿色开采是煤炭科学开发的核心内容,而煤炭开采水资源保护与利用是煤炭绿色开采面临的重大难题。我国煤炭绿色开采水平提升缓慢,严重影响了煤炭开采整体技术水平的提高。因此,习总书记2014年6月13日在有关能源革命的讲话中指出,煤炭开采对地下水资源和地表生态的破坏是煤炭开发面临的主要问题。

笔者针对水资源短缺的全球性问题,分析了我国煤炭资源与水资源逆向分布特征;总结了我国西部煤炭开采水资源保护利用的技术进展,指出矿井水井下储用是煤炭开采水资源保护与利用的主要技术方向。

2 水资源短缺是全球性问题

水是生命之源、生产之要、生态之基。据统计,地球上水的总储量约 $1.26 \times 10^{18} \text{ m}^3$,海水和其他咸水占97.47%,淡水仅占2.53%;其中,人类真正可利用的河水、淡水湖水和浅层地下水等淡水资源总

量约为 $4.15 \times 10^{15} \text{ m}^3$,仅占地球总水量的0.3%左右^[2-4]。随着世界人口数量增加,淡水需求量逐年增加,而可用淡水总量却以 $6.4 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ 的速度减少。目前,全球约7.8亿人难以获取可用的洁净淡水资源,超过20亿人生活在供水高度紧张的地区;预计到2050年,世界人口的67%将生活在水资源严重稀缺的地区^[5-10]。

中国从20世纪70年代开始出现水资源紧缺问题;20世纪80年代以来,中国的水资源紧缺由局部逐渐蔓延至全国,对国民经济带来严重影响。我国是全球最缺水的国家之一,2014年人均水资源已不足 2000 m^3 ,水资源形势极为严峻^[11]。我国淡水资源分布不均,表现为“南多北少,东多西少”:长江流域及其以南地区面积占全国36.5%,而水资源量占全国的81%;淮河流域及其以北地区的面积占全国63.5%,其水资源量仅占全国的19%;我国北方人口占全国总人口的2/5,但水资源占有量不足全国水资源总量的1/5^[12-14]。从水量上看,全国561个地级以上城市中400多个缺水。为缓解区域水资源紧张状况,我国相继修建了多项大型跨流域调水工程,如南水北调工程、天津引滦入津工程、山东引黄济青工程、山西引黄入晋工程和陕西引汉入渭工程等^[15],部分缓解了区域用水紧张难题。

3 水资源保护利用是煤炭绿色开发面临的重大技术难题

3.1 我国煤炭资源与水资源逆向分布

中国工程院相关研究表明,我国含煤盆地和煤炭资源呈“井”字型分布格局,即煤炭资源受东西向展布的天山—阴山构造带、昆仑—秦岭—大别山构造带和呈南北向展布的大兴安岭—太行山—雪峰山构造带、贺兰山—六盘山—龙门山构造带控制。煤炭资源分布具有西多东少、北多南少和东深西旱特征^[16]。目前,东部新汶、徐州等老矿区采深已达1000m左右,且资源日渐枯竭,开采复杂程度加大;西部地区煤炭埋藏浅、煤层厚、开采条件相对简单,已成为煤炭主产区,煤炭产量已占全国70%,且比例不断增加(图3)。

我国水资源与煤炭资源呈逆向分布,中西部富煤地区多处于干旱和半干旱的生态脆弱区,水资源短缺且地表生态脆弱;主要煤炭基地水资源短缺,矿区供水主要靠抽取地下水资源和矿井水综合利用,矿区建设面临找水、水资源综合利用和水权配置难

题^[17]。

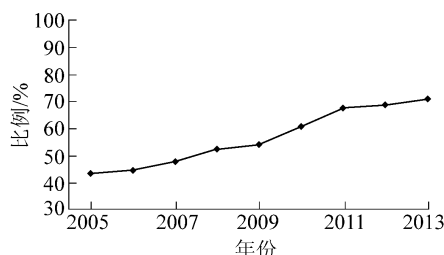


图3 西部煤炭产量占全国比例

Fig. 3 Percentage of coal production in western China

3.2 水资源保护利用是西部煤炭开发面临的重大难题

水资源保护与利用是煤炭开发长期面临的重大难题。据统计,我国开采1 t煤炭约产生2 t矿井水,但矿井水利用率仅25%左右^[18-20];目前每年产生矿井水约80亿t^[21],矿井水年损失量达60亿t,相当于我国每年工业和民用缺水量(100亿t)的60%。煤炭开发水资源损失的主要原因是矿井水外排地面没有得到有效利用,在西部矿区尤为明显。

我国西部煤炭主产区气候干旱,年蒸发量是降水量的6倍以上,为保障安全生产,矿井水都是外排地表后排放,但由于蒸发量大,不能有效储存和利用。如何实现煤炭开发与水资源保护利用相互协调是西部矿区煤炭绿色开发面临的重大技术难题,也是西部矿区生态文明建设的核心内容之一。

3.3 国家高度重视矿井水保护利用

矿井水保护利用已成为煤炭绿色开发的难点和热点问题,受到全社会的关注。习总书记在中央财经领导小组第六次会议上提出:我国煤炭资源丰富,“煤老大”在较长时间内作为我国主体能源的地位不会发生变化。煤炭的大量开采和使用带来两大突出问题:一是煤炭开采对地下水资源和地表生态的破坏;二是煤炭消费对环境的破坏。

为解决上述难题,党和国家颁布了一系列煤炭开发水资源保护利用的政策法规,提出了严格的要求。2015年5月中共中央、国务院在《关于加快推进生态文明建设的意见》中指出“积极开发利用再生水、矿井水、空中云水、海水等非常规水源,严控无序调水和人造水景工程,提高水资源安全保障水平”;2015年4月国务院在《水污染防治行动计划》(水十条)中指出“推进矿井水综合利用,煤炭矿区的补充用水、周边地区生产和生态用水应优先使用矿井水,加强选煤废水循环利用”;2015年4月国家能源局《煤炭清洁高效利用行动计划(2015—2020

年)》中提出“加大煤矸石、煤泥、煤矿瓦斯、矿井水等资源化利用的力度”、“有条件的矿区实施保水开采或煤水共采,实现矿井突水控制与水资源保护一体化”;2015年1月国家能源局等在《促进煤炭安全绿色开发和清洁高效利用的意见》中指出“统筹煤炭资源条件、矿山地质环境、水资源承载力和生态环境容量,确定合理的科学产能”,将水资源作为煤炭科学产能的约束条件;2015年全国人大修订的《中华人民共和国环境保护法》首次将“保障公众健康”写入总则第一条和明确规定“保护优先”的原则;2014年6月国务院《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》规定“依据区域水资源分布特点和生态环境承载能力,严格煤矿环保和安全准入标准,推广充填、保水等绿色开采技术”;2012年3月国家发展改革委在《煤炭工业发展“十二五”规划》也对矿井水利用率和地表生态修复提出了明确的指标要求;2012年2月国务院在《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》(国发〔2012〕3号)提出要确立水资源开发利用控制红线,确定了具体指标要求,明确指出重大项目建设要与当地水资源条件相适应^[22-29]等。党的十八届中央委员会第五次全体会议公报中提出了创新、协调、绿色、开放、共享五个发展理念,再次强调了节约资源和保护环境的基本国策,并将“生态环境质量”提升至一个新的高度。

上述政策法规对矿井水保护与利用提出了更为严格的要求,特别是西部煤炭主产区,必须研发相适应的技术,实现煤炭开采与水资源保护利用相互协调发展。

4 煤炭开采水资源保护利用的技术进展

长期以来,针对煤炭开采对地下水的影响问题,国内外进行了大量的技术研究和工程实践。钱鸣高院士率先提出煤炭绿色开采理念和西部矿区保水开采技术研究的若干领域,指出必须研发适合于西部矿区的煤炭开采与水资源协调技术^[30-32]。据此不同机构和学者展开了大量的研究工作,包括煤炭开采“三带”和煤炭开采地下水运移规律等基础研究^[33-40],形成了两类技术途径:一是以“堵截法”为特征的保水开采技术;二是以“疏导法”为特征的矿井水储存利用技术。

4.1 “堵截法”为特征的保水开采技术

“堵截法”保水开采技术的核心是保护煤层上

方隔水层完整性,避免形成导水裂隙,从而堵截地下水向下渗流,实现保护含水层地下水的目的。采用的主要技术手段包括充填开采、限高开采、房柱式开采、保水区域划分等^[41-47]。

充填开采在我国东部和中部矿区,特别是“三下”采煤中得到较好的应用,但在我国西部煤炭主产区推广应用,必须解决提高充填效率和降低充填成本等难题。针对西部煤炭开采地下水保护,相关学者研发了基于生态水位保护的保水区域划分、房柱式开采和条带式开采等技术^[48-50],但其推广应用尚需解决提高煤炭资源采出率等问题。

4.2 “疏导法”为特征的矿井水井下储用技术

该技术是采用疏导手段,在掌握并利用煤炭开采地下水运移规律基础上,将矿井水转移至采空区进行储存,并建设相应的抽采利用工程,确保矿井水不外排地表,实现矿井水资源的保护利用。

神华集团在神东矿区经过近20年技术攻关和工程实践,研发成功了煤矿地下水库技术,即利用煤炭开采形成的采空区岩体空隙,用人工坝体将不连续的安全煤柱连接形成水库坝体,形成相对封闭的储水空间,同时建设矿井水注入设施和取水设施,充分利用采空区岩体对矿井水的自然净化作用,实现矿井水井下储存与利用^[51-52],该技术已成功在神东矿区全面实施。

4.3 煤炭开采地下水资源保护利用的技术探索

针对西部矿区煤炭开采矿井水外排损失的问题,神华集团联合中国矿业大学(北京)、中国矿业大学、清华大学和中国煤炭科工集团西安研究院等高校和科研机构,在神东矿区开展了《神东矿区水资源保护性开采与综合利用技术》《神东矿区水资源保护性采煤技术研究与应用》《神东矿区现代煤炭开采对地下水资源和生态影响规律研究》等多项科技创新项目和工程实践,掌握了神东矿区煤炭开采地下水的运移规律,开展了矿井水保护利用的技术探索:一是设法阻止矿井水的产生,主要采用限高和充填开采技术;二是在地面建设储水设施;三是探索在井下储用矿井水。

研究表明,在神东矿区充填开采和限高开采虽然技术上可行,但大幅降低煤炭开采效率和煤炭资源采出率,难以大规模实施;在地面建设储水设施,面临征地困难、水资源蒸发浪费和水体污染严重等技术难题,也无法实施。据此,神华集团突破传统理念,开展了矿井水储存于井下采空区的技术探索,经

历了采空区储水设施、煤矿地下水库和煤矿分布式多层地下水库的技术发展历程,构建了较为完善的煤矿地下水库技术体系,包括水源预测、水库选址、库容设计、坝体构筑、安全监控和水质控制等6个方面^[53-54]。

5 煤矿地下水库技术在西部矿区成功应用

神华集团在神东矿区成功应用煤矿地下水库技术,目前累计建成35座煤矿地下水库,储水量约2500万 m^3 ;并在神东矿区大柳塔矿建成首座煤矿分布式多层地下水库,由2号煤层的3座地下水库和5号煤层的1座地下水库组成,储水量达710万 m^3 ,实现了矿井水不外排。近3年来,煤矿地下水库供应了矿区用水的95%以上,2014年煤矿地下水库给矿区供水达6500万 m^3 ,为世界唯一的2亿t级矿区提供了水资源保障;3年为神东矿区累计创造经济效益27.85亿元,包括节约生活和生产用水的购水费用23.29亿元和节约的矿井水外排费用、地面水处理费用及排污费用等4.56亿元。

神华集团已掌握了该技术成套的自主知识产权,累计申报煤矿地下水库方面的国内专利70余项,其中已授权的专利51项(发明专利29项);申报PCT专利4项,开辟了我国西部煤炭主产区煤炭开采水资源保护与利用新的路径,实现了煤炭开采与水资源保护利用的协调。其中“一种矿井地下水的分布式利用方法”发明专利荣获第十七届中国专利奖金奖,成为在1989年该奖项设立以来煤炭行业获得的第3个中国专利金奖;以该技术为核心技术支撑的“生态脆弱区煤炭现代开采地下水和地表生态保护关键技术”成果获得国家科技进步二等奖,“煤矿地下水库关键技术与应用”成果获得内蒙古自治区科技进步一等奖。

该技术相继被国土资源部和国家科技部等作为先进技术在全国进行推广应用,世界煤炭协会制作了煤矿地下水库专题案例,在世界主要煤炭企业推广应用。神华集团在所属的煤矿区,包括包头矿区、新街矿区、榆神矿区、宁东矿区、大雁矿区、新疆矿区等全面推广应用该技术;2015年9月国家科技部批准了神华集团以煤矿地下水库为核心技术建设的“煤炭开采水资源保护与利用”国家重点实验室,神华集团将致力于西部不同地质特征和煤炭开采条件下的矿区水资源保护利用技术研发和工程实施,为我国西部煤矿区煤炭开采水资源保护利用提供科技

支撑。

6 煤矿地下水库技术发展方向

煤矿地下水库技术涉及采矿工程、工程地质、水文地质、水利工程和环境工程等多个学科,是复杂的系统工程,面临众多技术难题,如水源预测、水库选址与规划、储水系数计算、坝体构筑工艺、坝体参数设计、库间通道建设、安全保障技术、岩体对矿井水净化规律、水质控制、高矿化度水处理等基础理论和应用技术难题,未来将依托“煤炭开采水资源保护与利用”国家重点实验室、联合国内外科研院所,开展基础理论与突破关键技术,形成适用于我国西部煤炭主产区的水资源保护与利用技术体系。未来将开展以下研究工作:

1) 煤炭开采对地下水系统的影响评价与区域水资源动态平衡理论研究。包括:煤炭开采岩体裂隙演化规律及控制机理、煤炭开采对地下水系统的影响规律、煤炭开采引起的应力场变化与地下水水位的影响、区域水资源动态平衡理论与技术等。

2) 煤矿地下水库基础理论研究。包括煤炭开采的采动应力场、裂隙场和渗流场“三场”关系及演化机理;采空区岩体对矿井水的自净化机理;煤矿地下水库储水对地下水循环系统和地表植被生长的影响;煤矿地下水库坝体安全与水体优化调度理论等。

3) 煤矿地下水库关键技术研发。包括煤矿地下水库坝体构筑工艺及参数优化研究、煤矿地下水库安全保障技术、煤矿地下水库协调运行技术、煤矿地下水库水质保障技术、煤矿地下水库水质分级处理技术、矿井水高效循环利用技术等。

4) 基于水资源保护的矿区生态建设理论与技术。包括地下水系统变化与生态环境系统的关系及作用机理、煤炭开采对地表生态环境系统的影响规律、煤炭高效开发对地表生态的影响规律、煤炭开采地表生态修复能力评价等。

5) 加大煤矿地下水库技术的推广应用,制定企业和行业技术标准,加快在西部缺水矿区推广该技术;逐步在西部条件适合的其他地区推广,包括向露天煤矿推广。

7 结 论

1) 水资源短缺是一个全球性问题,尤其在我国煤炭主产区的西部矿区,由于特殊的地理气候条件,干旱少雨,水资源供需矛盾十分突出,严重制约该地

区煤炭绿色开发。

2) 以“堵截法”理念为特征的保水开采技术必须进一步解决提高开采效率和煤炭资源采出率等技术难题。

3) 煤矿地下水库技术作为“疏导法”理念的代表技术,实现了煤炭资源与水资源的协调开采,为西部煤炭开采地下水保护利用开辟了一条有效的技术途径。

4) 煤矿地下水库技术复杂的系统工程,涉及采矿、水利、地质和环境等多个学科,还须进一步开展相关基础理论研究和攻关,从而形成适用于不同地质和开采条件的理论与技术体系,为保护利用我国每年煤炭开采损失的60亿t矿井水提供科技支撑。

参考文献(References):

- [1] BP公司. 2015年BP世界能源统计年鉴[R]. 伦敦: BP公司, 2015.
 - [2] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). United Nations World Water Development Report 2014, water and energy [R]. Paris: UNESCO, 2014.
 - [3] Speidel D H, Agnew A F. The natural geochemistry of our environment [M]. Colo.: Westview Press, 1982.
 - [4] Gleick P H. Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources [M]. New York: Oxford University Press, 1993.
 - [5] ICA. Global water security: Intelligence Community Assessment [R]. Washington: DC, 2012.
 - [6] UNU. "Water security": Experts propose a UN definition on which much depends [R]. Dresden: United Nations University, 2013.
 - [7] World Health Organization (WHO). Safer water, better health: Cost, benefits and sustainability of interventions to protect and promote health [R]. Geneva: WHO, 2008.
 - [8] UN Water. Tackling a global crisis: International year of sanitation [R] Paris: UN Water, 2008.
 - [9] Oki T, S Kanae. Global hydrological cycles and world water resources [J]. Science, 2006, 313(5790): 1068-1072.
 - [10] Wallace J S. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production [J]. Agric, Ecosystems & Environ, 2000, 82(1/3): 105-119.
 - [11] 中华人民共和国水利部. 2014年中国水资源公报[Z]. 2015-08-01.
 - [12] 钱正英, 张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
 - [13] 郦建强, 王建生, 颜勇. 我国水资源安全现状与主要存在问题分析[J]. 中国水利, 2011(23): 42-51.
- Li Jianqiang, Wang Jiansheng, Yan Yong. Current situation of water security and analysis of major problem in China [J]. China

- Water Resources 2011(23):42-51.
- [14] 宋先松,石培基,金蓉.中国水资源空间分布不均引发的供需矛盾分析[J].干旱区研究,2005,22(2):162-166.
Song Xiansong, Shi Peiji, Jin Rong. Analysis on the contradiction between supply and demand of water resources in China owing to uneven regional distribution [J]. Arid Zone Research, 2005, 22(2):162-166.
- [15] 沈佩君,邵东,郭元.国内外跨流域调水工程建设的现状与前景[J].武汉水利电力大学学报,1995,28(5):463-469.
Shen Peijun, Shao Dong, Guo Yuan. The present situation and prospect cross-basins diversion projects construction at home and abroad [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic And Electric Engineering, 1995, 28(5):463-469.
- [16] 田山岗,尚冠雄,唐辛.中国煤炭资源的“井”字型分布格局:地域分异性与资源经济地理区划[J].中国煤田地质,2006,18(3):1-5.
Tian Shangang, Shang Guanxiong, Tang Xin. Chinese coal resource octothorpe shaped distributing pattern: regional differentiation and resources economic geographical division [J]. Coal Geology of China 2006, 18(3):1-5.
- [17] 彭苏萍.煤炭资源与水资源-中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究[M].第1卷.北京:科学出版社,2014.
- [18] 谢克昌.中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究[M].北京:科学出版社,2014.
- [19] 谢和平,王金华.中国煤炭科学产能[M].北京:煤炭工业出版社,2014.
- [20] 中国科学院地理科学与资源研究所.噬水之煤:煤电基地开发与水资源研究[M].北京:中国环境科学出版社,2012.
- [21] 国家能源局.关于国家能源安全情况的汇报(征求意见稿)[Z].2014-04-01.
- [22] 中共中央、国务院.关于加快推进生态文明建设的意见[Z].2015-05-01.
- [23] 国务院.水污染防治行动计划(水十条)[Z].2015-04-01.
- [24] 国家能源局.煤炭清洁高效利用行动计划(2015—2020年)[Z].2015-05-01.
- [25] 国家能源局,环境保护部和工业和信息化部.促进煤炭安全绿色开发和清洁高效利用的意见[Z].2014-12-01.
- [26] 国务院.能源发展战略行动计划(2014—2020年)[Z].2014-06-01.
- [27] 国家发展改革委.煤炭工业发展“十二五”规划[Z].2012-03-01.
- [28] 国务院.关于实行最严格水资源管理制度的意见[Z].2012-02-01.
- [29] 全国人民代表大会常务委员会.中华人民共和国环境保护法[Z].2015年修订.2015-01-01.
- [30] 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 Minggao, Miao Xiexing, Xu Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment [J]. Journal of China Coal Society 2007, 32(1):1-7.
- [31] 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.
- [32] 钱鸣高.煤炭产能扩张引发中西部环境隐忧[J].资源与环境发展,2011(4):4-7,35.
Qian Minggao. Coal production capacity expansion caused environmental concerns in the Midwest [J]. Resources Environment and Development 2011(4):4-7,35.
- [33] 李连崇,唐春安,梁正召.考虑岩体碎胀效应的采场覆岩冒落规律分析[J].岩土力学,2010,31(11):3537-3541.
Li Lianchong, Tang Chun'an, Liang Zhengzhao. Investigation on overburden strata collapse around coal face considering effect of broken expansion of rock [J]. Rock and Soil Mechanics 2010, 31(11):3537-3541.
- [34] 郑军.上覆岩层运动规律的相似模拟试验研究[J].煤炭科技,2011(1):6-8.
Zheng Jun. Overburden movement law of similarity simulation test study [J]. Coal Science 2011(1):6-8.
- [35] 缪协兴,陈荣华,浦海,等.采场覆岩厚关键层破断与冒落规律分析[J].2005,24(8):1289-1295.
Miao Xiexing, Chen Ronghua, Pu Hai et al. Analysis of breakage and collapse of thick key strata around coal face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2005, 24(8):1289-1295.
- [36] 顾大钊,张建民.西部矿区现代煤炭开采对地下水赋存环境的影响[J].煤炭科学技术,2012,40(12):114-117.
Gu Dazhao, Zhang Jianmin. Modern coal mining affected to underground water deposit environment in West China Mining Area [J]. Coal Science and Technology 2012, 40(12):114-117.
- [37] 王连国,王占盛,黄继辉,等.薄基岩厚风积沙埋煤层导水断裂带高度预计[J].采矿与安全工程学报,2012,29(5):607-612.
Wang Lianguo, Wang Zhansheng, Huang Jihui et al. Prediction on the height of water-flowing fractured zone for shallow seam covered with thin bedrock and thick windblown sands [J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2012, 29(5):607-612.
- [38] 许家林,朱卫兵,王晓振.基于关键层位置的导水断裂带高度预计方法[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.
- [39] 张杰,侯忠杰.榆树湾浅埋煤层保水开采三带发展规律研究[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2006,21(4):10-13.
Zhang Jie, Hou Zhongjie. Study on three strap in water resources preservation in Yu-shu-wan shallow seam mining [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science Edition 2006, 21(4):10-13.
- [40] 胡小娟,李文平,曹丁涛,等.综采导水断裂带多因素影响指标研究与高度预计[J].煤炭学报,2012,37(4):613-620.

- Hu Xiaojuan ,Li Wenping ,Cao Dingtao ,*et al.* Index of multiple factors and expected height of fully mechanized water flowing fractured zone[J]. Journal of China Coal Society 2012 ,37(4) : 613 - 620.
- [41] 缪协兴,孙亚军,浦海,等. 干旱半干旱矿区保水采煤方法与实践[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社 2011.
- [42] 缪协兴,王安,孙亚军. 干旱半干旱矿区水资源保护性采煤基础与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009 ,28(2) : 217 - 227.
- Miao Xiexing ,Wang An ,Sun Yajun *et al.* Research on basic theory of mining with water resources protection and its application to arid and semi - arid mining areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2009 28(2) : 217 - 227.
- [43] 白海波,缪协兴. 水资源保护性采煤的研究进展与面临的问题[J]. 采矿与安全工程学报 2009 26(3) : 253 - 262.
- Bai Haibo ,Miao Xiexing. Research progress and major problems of water preserved coal mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2009 26(3) : 253 - 262.
- [44] 范立民. 论保水采煤问题[J]. 煤田地质与勘探 2005 33(5) : 50 - 53.
- Fan Limin. Discussin on coal mining under water - containing condition [J]. Coal Geology & Exploration ,2005 33(5) : 50 - 53.
- [45] 黄庆享. 浅埋煤层覆岩隔水性与保水开采分类[J]. 岩石力学与工程学报 2010 29(S2) : 3622 - 3627.
- Huang Qingxiang. Impermeability of overburden rock shallow buried coal seam and classification of water conservation mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Enigeering 2010 , 29(S2) : 3622 - 3627.
- [46] 李文平,叶贵钧,张莱,等. 陕北榆神府矿区保水采煤工程地质条件研究[J]. 煤炭学报 2000 25(5) : 449 - 454.
- Li Wenping ,Ye Guijun ,Zhang Lai *et al.* Study on the engineering geological conditions of protected water resources during coal mining action in Yu - Shen - Fu Mining Area in the North Shaanxi Province [J]. Journal of China Coal Society ,2000 ,25 (5) : 449 - 454.
- [47] 师本强,侯忠杰. 陕北榆神府矿区保水采煤方法研究[J]. 煤炭工程 2006(1) : 63 - 65.
- Shi Benqiang ,Hou Zhongjie. Research on coal mining method with water conservation in Yushen Mining Area [J]. Coal Engineering 2006(1) : 63 - 65.
- [48] 王双明,范立民,黄庆享. 基于生态水位保护的陕北煤炭开采条件分区[J]. 矿业安全与环保 2010 37(3) : 81 - 83.
- Wang Shuangming ,Fan Limin ,Huang Qingting ,*et al.* The partition of coal mining conditions in northern Shaanxi based on the ecological water level protection. Mining Safety & Environmental Protection [J]. 2010 37(3) : 81 - 83.
- [49] 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.
- [50] 刘洋,石平五,张状路. 浅埋煤层矿区“保水采煤”条带开采的技术参数[J]. 煤矿开采 2006 11(6) : 6 - 10.
- Liu Yang ,Shi Pingwu ,Zhang Zhuanglu. Technique parameters analysis of strip mining without destroying water resource in low-burying coal seam [J]. Coal Mining Technology 2006 11(6) : 6 - 10.
- [51] 顾大钊. 能源“金三角”煤炭现代开采水资源及地表生态保护技术[J]. 中国工程科学 2013 15(4) : 102 - 107.
- Gu Dazhao. Water resource and surface ecology protection technology of modern coal mining in China's energy “Golden Triangle” [J]. Engineering Sciences 2013 15(4) : 102 - 107.
- [52] 曹志国,李全生,董斌琦. 神东矿区煤炭开采水资源保护利用技术与应用[J]. 煤炭工程 2014 46(10) : 162 - 164 ,168.
- Cao Zhiguo ,Li Quansheng ,Dong Binqi. Water Resource Protection and Utilization Technology and Application of Coal Mining in Shendong Mining Area [J]. Coal Engineering. 2014 46(10) : 162 - 164 ,168.
- [53] 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.
- [54] 曹志国,何瑞敏,王兴峰. 地下水受煤炭开采的影响及其储存利用技术[J]. 煤炭科学技术 2014 42(12) : 113 - 116 ,128.
- Cao Zhiguo ,He Ruimin ,Wang Xingfeng. Coal mining affected to underground water and underground water storage and utilization technology [J]. Coal Science and Technology ,2014 42(12) : 113 - 116 ,128.