

煤矿矿井水井下处理及废水零排放技术进展

郭 强

(煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室,北京 102211)

摘要:为解决我国煤矿矿井水利用率低和排放污染环境等问题,促进矿井水的处理利用,论述了矿井水井下处理相关技术的基本原理、工艺路线、技术特点和工程案例,针对矿井水井下处理存在问题提出解决思路,并对矿井水井下处理发展前景进行展望。高密度沉淀、超磁分离和采空区过滤等技术能够实现悬浮物高效低成本脱除;成熟的膜处理和低温多效蒸发技术可广泛应用于矿井水浓缩脱盐;利用煤矿地下水库存储浓盐废水是实现矿井水处理废水零排放的一种有效方式。进一步开发适用于井下空间的高效化、模块化、可移动化的处理单元,增强处理单元的防爆性能、自动控制性能、安全监测性能,采用多种处理技术耦合,实现矿井水分级处理与分质利用,将是未来矿井水井下处理利用发展的必然趋势。

关键词:矿井水;井下;悬浮物;高矿化度;废水;零排放

中图分类号:X703 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2018)01-0033-05

Technical progress of underground mine water treatment and zero discharge of waste water

GUO Qiang

(State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining, Beijing 102211, China)

Abstract: In order to solve the problems of low utilization rate of coal mine water and environmental pollution, and to promote the treatment and utilization of mine water, the basic principle, process route, technical characteristics and project cases of underground mine water treatment technology were discussed. Aimed at the question of underground mine water treatment, the solutions were put forward, and the prospect was prospected. The results show that high-density sedimentation, super-magnetic separation and goaf filtration technology can achieve high efficiency and low cost removal of suspended solids, the membrane treatment and low temperature multi-effect evaporation technology can be widely used in mine water desalination, the underground coal reservoir storing concentrated salt wastewater is an effective way to achieve zero discharge of mine water treatment wastewater. It will be the development tendency and direction of underground mine water treatment and utilization that includes to develop efficient, modular and mobile processing units for the underground space, to enhance explosion-proof performance of the processing unit, automatic control performance and safety monitoring performance, to achieve mine water treatment and quality classification with a variety of processing techniques.

Key words: coal mine water; underground; suspended solids; high salinity; wastewater; zero discharge

0 引 言

水是人类赖以生存的重要资源之一,我国又是

水资源严重紧缺的国家,人均拥有水量仅是世界人均水量的1/4。煤矿矿井水是一类重要的非常规水资源,指在采煤过程中所有渗入井下采掘空间的地

收稿日期:2017-12-19;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.01.006

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501100);煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室资助项目(SHGF-16-24)

作者简介:郭强(1986—),男,内蒙古土右旗人,工程师,博士,从事粉煤灰提取氧化铝和矿井水处理方面的研究工作。E-mail: guoqiang_2004@163.com

引用格式:郭强.煤矿矿井水井下处理及废水零排放技术进展[J].洁净煤技术,2018,24(1):33-37,56.

GUO Qiang. Technical progress of underground mine water treatment and zero discharge of waste water[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(1): 33-37, 56.

下水。据国家能源局统计,近几年我国每年煤炭开采产生矿井水量约 80 亿 t,但利用率仅为 25%,损失 60 亿 t,约占我国工业和民用缺水量(100 亿 t)的 60%。当前煤炭仍是我国的主体能源,长期占我国一次能源生产和消费的 70% 左右,而且这种局势短期不会有根本变化^[1-3]。伴随着煤炭开采,大量矿井水产生并未经处理直接外排,不仅破坏地下水系,矿井水中所含煤粉和盐分还会对周围环境产生严重污染。我国西部地区,特别是山西、内蒙、陕西和新疆,煤炭储量占全国总量的 80% 以上,但水资源只占 20% 左右,属于严重缺水地区。为了实现西部矿区可持续发展,处理利用矿井水,实现矿井水资源化具有重大的环境和社会效益^[4-7]。

煤矿矿井水本身水质主要受当地水文地质、气候、地理等自然条件的影响,根据矿井水含污染物特征,一般可分为洁净矿井水、含悬浮物矿井水、高矿化度矿井水、酸性矿井水和含特殊污染物的矿井水。北方煤炭主产区的矿井水主要为含悬浮物矿井水和高矿化度矿井水。煤矿矿井水传统的处理方法是将矿井水输排到地面后,通过混凝、沉淀、澄清和过滤去除悬浮物,然后通过电渗析或膜处理浓缩脱盐。该过程在输排矿井水时能耗大,处理系统占地大,处理周期长,且处理产生的固体废渣和浓盐水存放过程中对环境造成二次污染。部分研究者提出在井下进行矿井水处理,并进行了工程实践。李福勤等^[8]介绍了近年来我国矿井水井下处理新技术,分析了井下处理工程存在的问题。何绪文等^[5]也对近年来我国矿井水的化学特征,高悬浮物、高铁锰、高矿化度矿井水处理技术以及矿井水井下处理就地复用和自动化控制方面取得的新进展进行了全面阐述,并对矿井水井下处理的发展趋势进行了预测。刘立民等^[9]提出矿井水井下循环利用的技术方案,结合兖矿集团南屯煤矿井下水处理系统和井下供水系统改造的具体情况,对矿井水井下处理利用的经济效益进行计算分析,表明建立的井下矿井水处理系统实现了矿井水的井下循环利用,技术上可行,经济上合理。周如禄等^[10]利用煤层开采后形成的采空区,采用曝气氧化池和压力式气水相互冲洗滤池相结合的工艺,将矿井水在井下直接处理后循环作为防尘洒水和设备冷却用水就地复用。运行实践表明该工艺系统不需要投加化学药剂,适合煤矿井下巷道环境,具有流程简短、处理设施少、处理成本低、自动化程度高、运行稳定等优点。

随着环保要求的日益增加,西部矿区的矿井水已经不允许排放,实现矿井水的井下高效处理利用与废水零排放将是矿井水资源化的主要方向。本文分析了矿井水井下处理脱除悬浮物 and 无机盐的新技术,包括重介质分离、超磁分离、采空区过滤、膜法脱盐和低温多效蒸发脱盐等,并提出一种应用煤矿地下水储存脱盐废水的零排放方式,针对煤矿矿井水井下处理存在的问题提出可能的解决方法,并对未来发展方向进行展望,以期促进矿井水井下处理技术的发展和应

1 含悬浮物矿井水处理

矿井水中的悬浮物主要来自矿井水流经采掘工作面时带入的煤粉、岩粉和黏土,含量为 100 ~ 400 mg/L,具有粒径小、密度轻、自然沉降时间长等特点。常规的混凝沉降处理占地大,处理时间长,不能满足矿井水井下高效快速去除悬浮物。目前常用的井下处理方式主要是高密度沉降技术、超磁分离技术和采空区过滤技术等。

1.1 高密度沉降技术

高密度沉降技术通过加入高密度介质,同时加药,使矿井水中的悬浮物形成大絮凝体,较大的絮凝体具有大的密度和半径,从而增加沉降速度,相同处理量下沉淀池体积大为减小^[11-12]。高密度沉淀池集混合区、反应区、沉淀区于一体,前端混合区高密度介质的外循环不仅保证了搅拌反应池的固体浓度,提高了悬浮物的絮凝能力,使形成的絮凝体更加均匀密实。末端采用斜板沉降,同时回收污泥中的重介质,极大提高了混凝沉淀作用和处理效果。神华宁煤灵新矿采用高密度沉降技术进行矿井水的去除悬浮物处理,其工艺路线如图 1 所示。矿井水经巷道内沟渠集水后,汇总至进水渠内经机械格栅去除大颗粒物质后进入调节预沉池,经过调节预沉池处理的水由提升泵提升至高密度高效沉淀水处理设备,混凝区和反应区通过投加混凝剂(聚合氯化铝 PAC 和聚丙烯酰胺 PAM)和重介质微砂,使悬浮物在较短时间内形成以微砂为载体的“微絮团”。絮凝后,水进入沉淀段的底部向上方流动,通过高密度斜板增加絮凝颗粒沉淀面积,出水由集水渠收集后通过重力流入水仓。污泥循环泵连续抽取沉积在设备沉淀区储泥斗中的泥水混合物,将微砂和污泥输送到泥砂分离器中。从污泥中分离出来的微砂直接投加到混合池中循环使用,污泥从分离装置上部溢

出排往污泥池。高密度沉淀技术具有处理效率高、设备占地小、处理效果稳定等优点,对于矿井水井下处理具有广泛的应用前景。

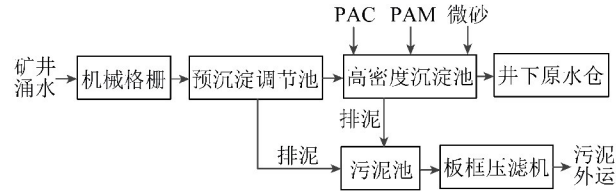


图1 灵新煤矿矿井水工艺流程

Fig. 1 Process flow of Linxin coal mine water

1.2 超磁分离技术

超磁分离技术的原理是向待处理的水体中加入磁种,磁种作为絮体的凝结核使非磁性悬浮物在混凝剂和助凝剂联合作用下与磁种结合,形成带有磁性的絮凝体颗粒。含有磁性絮凝体颗粒的水体经过超磁分离机时,超磁分离机的永磁强磁性磁盘能产生大于重力的磁力,瞬间将磁性絮凝体吸附,实现水质净化。被磁盘分离出来的残渣经过磁种回收系统回收磁种后,重新回用到混凝系统中循环使用,剩余的污泥被输送到污泥处理系统。胡建军等^[13]采用超磁分离技术对协庄煤矿矿井废水进行净化处理,说明该技术具有较好的经济性和安全性。张国光^[14]研究了矿井水超磁分离技术的工艺流程和技术优势,并以山东某矿业集团公司3个典型的井下磁分离净化水处理工程项目为例,通过与传统水处理工艺进行技术、经济对比,说明矿井水超磁分离净化技术效率高、占地面积小、设备可靠耐用、投资和运行成本低,非常适合于矿井水井下处理。

1.3 采空区过滤技术

与高密度沉降技术和超磁分离技术不同,采空区过滤技术不需要专门的水处理设备和药剂,仅利用煤炭开采过程形成的采空区进行矿井水过滤去除悬浮物,该技术处理成本低,也不会形成二次污染^[15]。目前大部分井工矿都采用全部垮落法处理顶板,煤层的上附岩层主要由砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩和中砂岩组成。采空区的填充物主要是煤层顶板和少量残煤,在开采扰动和重力的作用下,填充物形成密实的高孔隙率的岩石滤体。将含悬浮物的矿井水从采空区水平标高较高的地方送入采空区后,在重力作用下水体渗透过填充物流向低洼处,而悬浮物被截留,实现悬浮物的去除。此外,煤层顶底板中还含有一些黏土矿物,可

以吸附矿井水中的油脂,并对水中的钙镁离子进行吸附交换,降低水的硬度。陈苏社等^[16]利用大柳塔矿的采空区对矿井水进行了净化处理,结果表明悬浮物总去除率达到95%以上,并且随着净化时间延长,处理效果更为显著。

2 高矿化度矿井水处理

高矿化度矿井水是指含盐量高于1 000 mg/L的矿井水,我国北方煤矿主产区矿井水含盐量在1 000~3 000 mg/L,宁东地区达到7 000~10 000 mg/L,新疆地区可达12 000 mg/L。高矿化度矿井水的盐含量主要来自于 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等离子。处理高矿化度矿井水的主要目的是脱盐,目前常用的方法为膜法和热法。

2.1 膜法脱盐

膜法脱盐是目前应用最广泛的高矿化度矿井水脱盐方法,特别是随着各种膜技术成熟和成本降低,膜法的应用范围还在逐渐增加^[17]。膜法脱盐主要采用反渗透膜和纳滤膜,反渗透膜用来浓缩矿井水,纳滤膜用来分离一价盐和二价盐。典型的膜法脱盐工艺如图2所示。矿井水经过预处理后首先经过保安过滤系统,进一步脱除水中的悬浮物,使其达到反渗透系统的进水标准。经过保安过滤系统的水先进入中间水池缓冲,然后进入反渗透系统进行脱盐处理。为了保证脱盐后的回用水率,反渗透系统分为低压反渗透和高压反渗透两级,缓冲池的水先经过低压反渗透系统产生达标的回用水和一级浓盐水,回用水直接进入清水仓备用,一级浓盐水继续进入二级反渗透系统进一步脱盐浓缩,产出的浓盐水进入地下水封库封存,清水进入清水仓备用。

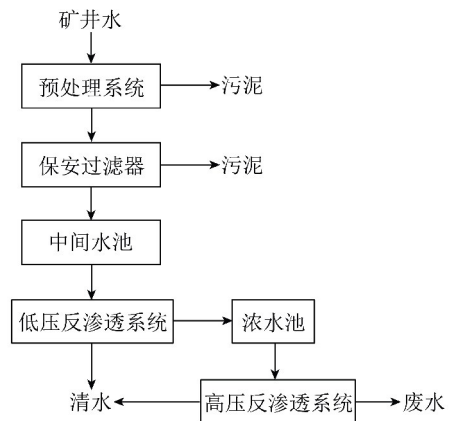


图2 矿井水膜法脱盐处理工艺

Fig. 2 Desalination process of coal mine water by membrane

2.2 热法脱盐

矿井水含盐量高于 10 000 mg/L 时,膜法脱盐在工程应用中极易产生膜结垢、变形等问题,缩减了膜的使用寿命,增加了水处理成本。与膜法脱盐相比,热法脱盐在处理含盐量高于 10 000 mg/L 的矿井水时更具优势。低温多效蒸发是目前使用较广泛的一种热法脱盐技术,在海水淡化方面应用广泛^[18]。低温多效蒸发是将几个蒸发器串联运行的蒸发操作,使蒸汽热得到多次利用,从而提高热能利用率。蒸发器工作原理为高浓度含盐水由加热器顶部进入,经液体分布器分布后呈膜状向下流动,在管内被加热汽化,被汽化的蒸汽与液体一起由加热管下端引出,经汽-液分离得到浓缩液。浓缩液经结晶或喷雾干燥就可以实现矿井水处理零排放。这种处理方式特别适合有坑口电厂的煤矿使用,利用电厂的废弃蒸汽作为热源,可有效降低处理成本,实现高矿化度矿井水的高效低成本处理。

3 废水零排放

矿井水经过去除悬浮物和脱盐浓缩后,会产生一部分高含盐量的废水。随着环保要求日益严格,废水零排放已经在内蒙古、宁夏等煤矿主产地开始实施。高含盐废水零排放一般通过蒸发结晶处理,实现盐的分级回收和水的回用。蒸发结晶过程能耗较大,产生一定量的杂盐,后续处理比较困难,不适合矿井废水的处理。高盐废水零排放技术有望采用井下封存。井下封存主要是将高盐废水存储于密闭采空区形成的煤矿地下水库。顾大钊^[19]研究煤矿地下水库建设,并在神东矿区进行实践工程,验证了煤矿地下水库对于矿井水存储的可靠性。高盐废水存入煤矿地下水库后,还可通入低含盐矿井水进行稀释,重新处理回用。地下水库存储高盐废水不仅经济安全,也不会造成其他污染,具有良好的经济、社会效益和推广前景。

4 矿井水井下处理存在问题与解决思路

与传统的矿井水地面处理相比,由于受到井下特殊环境的限制,井下处理还需解决一些关键技术问题,主要包括井下空间布置利用、设备安全防爆防腐、药剂扩散污染和系统自动控制等^[8]。

4.1 井下空间布置利用

井下处理与地面处理的显著差别之一就是井下空间的有限性,井下处理设备的安装通常选择在废

弃巷道,一般巷道的宽度为 5 m,高度为 4 m,很难容纳常规地面处理设备。为了满足处理设备在井下安装运行,除了选择高效小型化的模块处理设备,合理设计布置处理设备外,还需对巷道进行拓宽加固,对相关硐室进行改造。

4.2 设备安全防爆防腐

煤矿对井下生产设备有特殊要求,必须满足防爆、防潮、防水、防尘和防电技术,因此必须对井下处理设备和相应的电气系统进行特别设计,以满足井下安全要求。井下环境较为潮湿,对铁质设备和管路腐蚀性较大,必须对关键设备进行防腐设计,采用钛等材料替换核心设备的关键部件。对管路和阀门等辅助系统进行严格的防腐处理,或采用玻璃钢等防腐材料,运行期间定时检查设备及管路,及时更换受损部件。

4.3 药剂扩散污染

目前矿井水去除悬浮煤粉和岩粉时,都需要加入 PAC、PAM 作为混凝剂。由于矿井涌水量变化较大,缓冲池容量有限,为满足沉降效果,药剂加入量往往过量。部分过量的药剂会随污泥和反渗透废水重新回到矿井水和地下水系,造成地下水污染。为了防止残留药剂污染地下水,开发无药剂的直滤系统,如陶瓷膜直滤系统,或采用采空区过滤技术,减少药剂使用量。

4.4 系统自动控制

由于矿井水涌水量和水质变化较大,目前井下处理系统还无法实现地面水处理系统的自动控制。通过采空区过滤,煤矿地下水库对矿井水过滤和存储,实现矿井水水质水量稳定。同时采用地面处理自动控制系统,实现矿井水井下处理水质、水量监测,自动加药、排泥、警报等功能。

5 发展前景

1)改进和完善井下处理系统。与成熟的地面处理系统相比,井下处理系统许多技术还在模仿地面处理系统,开发适用于井下空间的高效化、模块化、可移动化的处理单元,增强处理单元的防爆性能、自动控制性能、安全监测性能,将是未来矿井水井下处理系统发展的必然趋势。

2)采用多种处理技术耦合降低矿井水处理成本。矿井水处理利用的主要限制因素是利用途径和处理成本,结合矿井水复用目标和要求,采用多种处理技术耦合,合理制定处理方案,优化工艺路线和技

术参数,达到矿井水梯级分质处理和分级利用,能够有效降低处理成本,推动矿井水的处理利用。

3)建立矿井水市场开发的政策支持体系及监督体系。政府应当制定优惠的财政政策、税收政策等,对矿井水开发项目给予资金及技术上支持,对实施矿井水市场化的煤矿及可利用矿井水的企业单位等给予优惠的税收政策。同时建立矿井水技术服务体系和监督管理体系,对矿井水处理水质及煤矿矿井水排放情况给予合理监管,从而促进矿井水市场的开发。

6 结 语

矿井水的处理利用和废水零排放技术不仅减少西部煤炭主产区矿井水的外排浪费和环境污染,还提高了矿井水的利用率,为煤炭利用的下游产业提供额外水源,有效降低了缺水地区水资源使用成本。高密度沉淀技术、超磁分离技术和采空区过滤技术已成功应用于去除矿井水中的悬浮物;成熟的膜法脱盐和热法脱盐也广泛应用于高矿化度矿井水的浓缩脱盐。利用煤矿地下水库进行浓盐水存储和稀释复用,能够有效解决浓盐废水零排放问题,大幅降低矿井水处理成本,在矿井水井下处理中具有良好的应用前景。

参考文献 (References):

- [1] 郇建强,王建成,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 Jiasheng, YAN Yong. Current situation of water security and analysis of major problem in China[J]. China Water Resources, 2011(23):42-51.
- [2] 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.
- [3] 李井峰,熊日华.煤炭开发利用水资源需求及应对策略研究[J].煤炭工程,2016,48(7):115-117,121.
LI Jingfeng, XIONG Rihua. Research on water resource demand of coal-based industries and the solution strategy[J]. Coal Engineering, 2016, 48(7):115-117, 121.
- [4] 陈佩佩.西北矿区供水现状及矿井水综合利用研究[J].煤矿开采,2017,22(5):60-63.
CHEN Peipei. Study of mine water comprehensive utilization and current situation of northwest mining area water supply[J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(5):60-63.
- [5] 何绪文,李福勤.煤矿矿井水处理新技术及发展趋势[J].煤炭

科学与技术,2010,38(11):17-22.

- HE Xuwen, LI Fuqin. New technology and development tendency of mine water treatment[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(11):17-22.
- [6] 戚鹏,武强,李晓翔,等.矿井水处理工艺及治理效益分析[J].水处理技术,2010,36(4):125-126.
QI Peng, WU Qiang, LI Xiaoxiang, et al. Analysis of wastewater disposal and disposal economy on coal mining wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(4):125-126.
- [7] 袁航,石辉.矿井水资源利用的研究进展与展望[J].水资源与水工程学报,2008,19(5):50-57.
YUAN Hang, SHI Hui. Research progress and prospect of coal mine water resource utilization[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2008, 19(5):50-57.
- [8] 李福勤,何绪文,吕晓龙,等.煤矿矿井水井下处理新技术及工程应用[J].煤炭科学技术,2014,42(1):117-120.
LI Fuqin, HE Xuwen, LYU Xiaolong, et al. Engineering application and new technology of underground mine water treatment[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1):117-120.
- [9] 刘立民,连传杰,卫建清,等.矿井水井下处理、利用的工艺系统[J].煤炭工程,2003,35(9):58-60.
LIU Limin, LIAN Chuanjie, WEI Jianqing, et al. Underground mine water disposal method and water supply system[J]. Coal Engineering, 2003, 35(9):58-60.
- [10] 周如禄,高亮,郭中权,等.煤矿矿井水井下直接处理及循环利用[J].中国给水排水,2013,29(4):71-74.
ZHOU Rulu, GAO Liang, GUO Zhongquan, et al. Underground direct treatment and recycle of coal mine water[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(4):71-74.
- [11] 王丽娜,王洪波,李莹莹,等.高密度沉淀池技术概述[J].环境科学与管理,2011,36(6):64-66.
WANG Lina, WANG Hongbo, LI Yingying, et al. Review of densadeg technique[J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(6):64-66.
- [12] 石瑾,孔令勇,王鲲鹏.高密度澄清池(DENSADEG(R))的基本原理及其在净水厂中的应用[J].净水技术,2007,26(6):58-61.
SHI Jin, KONG Lingyong, WANG Kunming. Mechanism of DENSADEG high-density clarifier and its application in water purification plant[J]. Water Purification Technology, 2007, 26(6):58-61.
- [13] 胡建军,郎秀雷.矿井水超磁分离净化技术在矿井的应用[J].山东煤炭科技,2012(6):57-59.
HU Jianjun, LANG Xiulei. Application of mine water super-magnetic separation and purification technology[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2012(6):57-59.
- [14] 张国光.井下磁分离水处理系统节能量及经济效益测算[J].洁净煤技术,2015,21(1):117-120.
ZHANG Guoguang. Energy-saving and economic benefits calculation of mine water underground magnetic separation system[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(1):117-120.

- 2014,114:1547-1607.
- [7] 国家能源局. 国家能源局关于印发《煤炭深加工产业示范“十三五”规划》的通知[EB/OL]. (2017-02-08) [2017-12-25]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto83/201703/t20170303_2606.htm?keywords.
- [8] 甘建平, 马宝歧, 尚建选, 等. 煤炭分质转化理念与路线的形成和发展[J]. 煤化工, 2013, 41(1): 3-6.
GAN Jianping, MA Baoqi, SHANG Jianxuan, et al. Formation and development of the coal grading conversion ideas[J]. Coal Chemical Industry, 2013, 41(1): 3-6.
- [9] 王向辉, 门卓武, 许明, 等. 低阶煤粉煤热解提质技术研究现状及发展建议[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(6): 36-41.
WANG Xianghui, MEN Zhuowu, XU Ming, et al. Research status and development proposals on pyrolysis techniques of low rank pulverized coal[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6): 36-41.
- [10] 郭树才. 煤化工工艺学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [11] ZHANG J, WU R, ZHANG G, et al. Technical review on thermochemical conversion based on decoupling for solid carbonaceous fuels[J]. Energy Fuels, 2013, 27(4): 1951-1966.
- [12] 赵振本. 高挥发分煤的合理利用途径-低温干馏和半焦联合发电工艺[J]. 煤炭加工与综合利用, 1984(2): 86-92.
- [13] ATWOOD M T, SCHULMAN B L. Toscoal process emdash pyrolysis of western coals and lignites for char and oil production[J]. Preprints of Papers American Chemical Society Division of Fuel Chemical, 1977, 22(2): 233-252.
- [14] 方梦祥, 岑建孟, 石振晶, 等. 75 t/h 循环流化床多联产装置实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(29): 9-15.
FANG Mengxiang, CEN Jianmeng, SHI Zhenjing, et al. Experimental study on 75 t/h circulating fluidized bed poly-generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(29): 9-15.

(上接第37页)

- [15] 冯利利, 朱岳麟, 陈锁忠, 等. 采空区处理含悬浮物矿井水的效果研究[J]. 能源环境保护, 2004, 18(6): 40-42.
FENG Lili, ZHU Yuelin, CHEN Suozhong, et al. Research of results on disposal of mine drainage containing suspended solids through goaf[J]. Energy Environmental Protection, 2004, 18(6): 40-42.
- [16] 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.
- [17] 张春晖, 何绪文, 张凯, 等. 膜科学新技术在矿业环境保护中的应用[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(3): 125-128.
ZHANG Chunhui, HE Xuwen, ZHANG Kai, et al. Membrane science new technology and its application in mining environmental protection[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 125-128.
- [18] 唐刚, 马燕燕. 矿井废水零排放处理技术方案的研究[J]. 东方电气评论, 2014, 28(4): 76-80.
TANG Gang, MA Yanyan. Study on zero discharge technology program of mine wastewater[J]. Dongfang Electric Review, 2014, 28(4): 76-80.
- [19] 顾大钊. “能源金三角”地区煤炭开采水资源保护与利用工程技术[J]. 煤炭工程, 2014, 46(10): 33-37.
GU Dazhao. Water resource protection and utilization engineering technology of coal mining in "energy golden triangle" region[J]. Coal Engineering, 2014, 46(10): 33-37.