



移动扫码阅读

高杰. 两级预沉-澄清工艺处理大型高悬浮物含氟矿井水——以正通煤业为例[J]. 能源环境保护, 2023, 37(4): 165-170.

GAO Jie. Treatment of large-scale mine drainage with high suspended solid and fluoride by the process of two-stage preprecipitation and mechanical clarifier; A case study of Zhengtong coal mine[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(4): 165-170.

## 两级预沉-澄清工艺处理大型高悬浮物含氟矿井水 ——以正通煤业为例

高杰

(中煤科工集团杭州研究院有限公司, 浙江 杭州 311201)

**摘要:** 煤矿矿井水处理及资源化利用是保护矿区生态环境与解决矿区缺水问题的有效途径。针对正通煤业矿井水水量大、悬浮物含量高、矿化度高、含氟化物的特点, 采用了以两级预沉-澄清为主体的矿井水净化处理工艺, 并对该工艺的机械澄清单元进行了针对性的改良, 使其实现悬浮物和氟化物的协同去除。工程运行结果表明, 矿井水在进水 SS 平均浓度为  $3\ 342\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 聚合氯化铝和聚丙烯酰胺投加量分别为  $80\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.8\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的情况下, 辐流预沉池、平流沉淀池和机械加速澄清池的 SS 平均去除率分别为 72.5%、48.3%、98.1%; 进、出水氟化物分别为  $1.26\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.87\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率达 31.0%, 出水指标优于设计标准, 矿井水净化处理的运行成本 0.34 元/吨水。

**关键词:** 高悬浮物; 氟; 矿井水; 两级预沉; 协同处理

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2023)04-0165-06

### Treatment of large-scale mine drainage with high suspended solid and fluoride by the process of two-stage preprecipitation and mechanical clarifier: A case study of Zhengtong coal mine

GAO Jie

(CCTEG Hangzhou Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 311201, China)

**Abstract:** Treatment and resource utilization of mine drainage is an effective way to protect the ecological environment and address the issue of water shortage in mining areas. According to the characteristics of mine drainage of large water flow, high suspended solid, high salinity and containing fluoride, the purification process of two-stage preprecipitation and clarification was adopted in Zhengtong coal mine, and the mechanical clarification unit was optimized to synergistically remove suspended solid and fluoride. The operation result showed that the average SS removal rates of radial flow sedimentation tank, horizontal flow sedimentation tank and mechanical accelerated clarifier were 72.5%, 48.3% and 98.1%, respectively, under the conditions of the average concentration of influent SS was  $3\ 342\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and the dosages of PAC  $80\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and PAM  $0.8\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . The influent and effluent concentrations of fluoride were  $1.20\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $0.93\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectively. The fluoride removal rate achieved 31.0%. The effluent quality indexes were better than the design criteria. The operation cost of mine drainage treatment was  $0.34\ \text{yuan} \cdot \text{ton}^{-1}$ .

**Keywords:** High suspended solid; Fluoride; Mine drainage; Two-stage preprecipitation; Co-processing

## 0 引言

煤矿矿井水是煤炭在开采过程中,采煤层及开拓巷道附近的地下水及部分地表水经岩层裂隙渗入巷道而形成的废水<sup>[1-2]</sup>。受区域位置、水文地质条件、水动力学、地质化学、矿床地质构造条件和开采方式的影响,不同煤矿矿井水的水质特征呈现显著的差异<sup>[3-4]</sup>。从矿井水自身的物理化学性质以及资源化利用的角度出发,煤矿矿井水可分为洁净矿井水、含悬浮物矿井水、高矿化度矿井水、酸性矿井水以及含特殊污染物矿井水等(如氟化物、重金属、放射性元素等)类型<sup>[5-6]</sup>。目前,针对各种类型的矿井水处理技术在国内非常成熟,但对不同类型、特点、处理要求或多种类型混合的矿井水进行处理时,在工程应用中选取工艺路线的侧重点应作出相应的调整。对一些大规模的高悬浮物矿井水,净化处理工艺选择时的经济性是设计时需要重点考虑的因素<sup>[7-8]</sup>;对一些需要进行矿井水脱盐处理的高矿化度含悬浮物矿井水,在工程应用时就需要考虑净化处理工艺与后续脱盐工艺的匹配性,需排除一些聚丙烯酰胺投加量高的矿井水净化处理工艺(如磁分离、重介速沉等)<sup>[9-10]</sup>;对一些含特殊污染物的矿井水,工程应用时就应该考虑将其与矿井水净化处理和脱盐处理进行针对性的匹配,从而减少矿井水处理工艺单元和建设投资<sup>[11]</sup>。

本文介绍了陕西省咸阳市正通煤业高悬浮物含氟矿井水的工艺技术情况,并结合实际运行数据,对主要处理单元的污染物去除效果进行了分析和比较。

## 1 水量和水质

该矿正常时的井下平均涌水量约  $9.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,但在井下清理水仓、轮转水仓、检修水泵时,最高涌水量在短时间内(一般不超过 6 h)会超过  $12.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。工程处理规模为  $9.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,是国内目前最大的单项矿井水处理设计项目。

由于井下涌水量大,矿井水在井下水仓停留时间较短,造成排至地面的矿井水中的悬浮物含量较高,矿井水中的悬浮物浓度大多数时候在  $2\,000 \sim 5\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。然而在井下每月清水仓时,短时间排至地面的矿井水中的悬浮物浓度会突破  $10\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。矿井水中的离子指标相对稳定,与《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)

Ⅲ类水质常规 24 项指标进行对比,发现矿井水中的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  和氟化物超标,矿井水中的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  和 SS 成线性关系,随着 SS 的去除而去除,一般不需要生化处理;经检测,矿井水中的氟化物为  $1.20 \sim 1.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;另外,矿井水中的溶解性总固体约为  $3\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。按照矿井水水质分类标准划分,该矿矿井水属于高悬浮物、高矿化度、含特殊污染物(氟化物)的混合型水质矿井水。

设计进水指标依据实测污染物指标并适当保留一定余量,设计出水指标在满足《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)排放标准的同时,还对悬浮物进行严格地控制,使出水能够满足矿内矿井水深度脱盐处理对进水悬浮物的水质要求。

设计进、出水水质主要指标见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Table 1 Design influent and effluent quality

项目	进水	出水
pH	6~9	7~9
$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\leq 600$	$\leq 20$
$\text{SS}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\leq 5\,000$	$\leq 10$
氟化物/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\leq 1.3$	$\leq 1.0$

## 2 工艺流程

目前,国内绝大多数含悬浮物矿井水处理都是采用“一级初沉+混凝沉淀(或澄清)”的主体净化处理工艺,其中的预沉单元以平流沉淀池为主,混凝沉淀(或澄清)单元多采用水力混凝、水力澄清或成套设备(如重介速沉、磁分离、一体化净水器、高效旋流器等)<sup>[12-13]</sup>。针对该矿矿井水处理水量大、悬浮物含量高、矿化度高、含特殊污染物(氟化物)的水质特点,以及水量和水质冲击负荷冲击大的实际情况,矿井水预沉单元采用了“辐流预沉+平流沉淀”串联组成的两级预沉工艺,使矿井水中绝大多数的大颗粒煤粉和煤粒在此得到去除,减轻后续处理单元的运行负荷和费用。为提高混凝沉淀(澄清)单元的水质冲击负荷,设计采用了机械加速澄清池,同时为实现矿井水中氟化物和悬浮物的协同去除,还对机械加速澄清池的有关工艺参数进行了针对性优化<sup>[14-16]</sup>。为防止因进水悬浮物高而穿透预处理单元和机械加速澄清池,过滤单元采用了纳污能力较强的均质滤料滤池。为节省投资,实现煤泥水的资源化利用,设计将矿井水处理过程中产生

的煤泥水提升至矿内选煤厂进行合并处理,煤泥水在经过选煤厂浓缩和压榨后的溢流水再回流至

矿井水处理系统的配水井,形成内外循环<sup>[17]</sup>。矿井水处理工艺流程和水量平衡如图 1 所示。

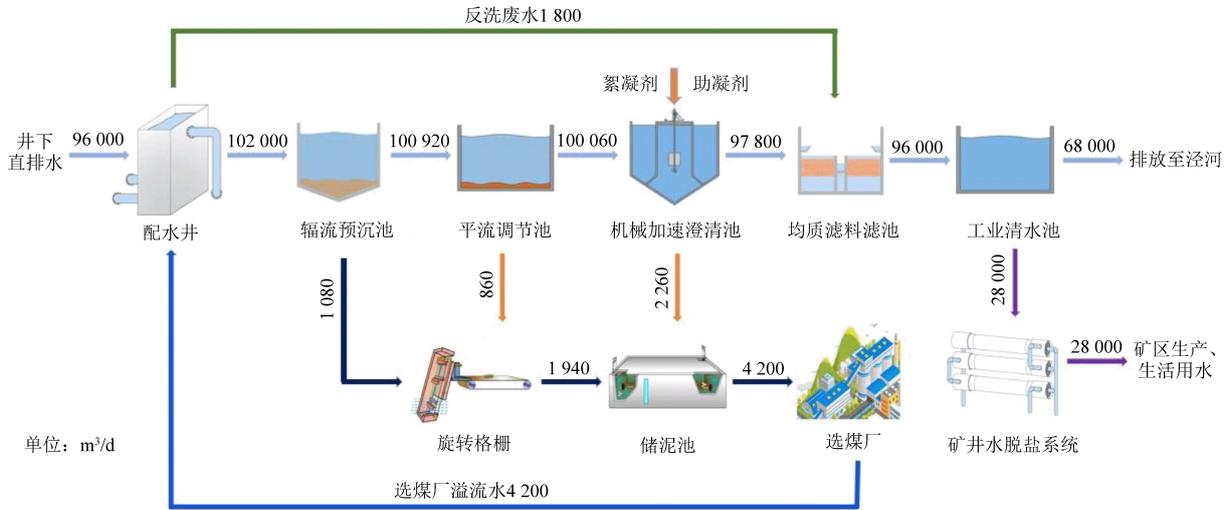


图 1 矿井水处理工艺流程与水量平衡

Fig. 1 Treatment flow chart and water balance of mine drainage

### 3 主要工艺参数

主要工艺设计参数详见表 2。

表 2 主要工艺设计参数

Table 2 Main design parameters

项目	设计参数
辐流预沉池	表面负荷: $3.9 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
	水力停留时间: 0.8 h
平流沉淀池	水平流速: $4.9 \text{ mm/s}$
	水力停留时间: 2.20 h
机械加速澄清池	表面负荷: $3.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
	絮凝时间: 32 min
	泥渣循环比: 8 : 1
	水力停留时间: 2.1 h
	污泥浓度: 3%
均质滤料滤池	正常滤速: $8.0 \text{ m/h}$
	强制滤池: $8.7 \text{ m/h}$
	滤料厚度: 1.25 m
	气洗强度: $55 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
	气水联合水洗强度: $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
	水洗强度: $17 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
	表明扫洗强度: $4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

### 4 运行效果及分析

工程从 2019 年 5 月开始进行系统调试,通过开展混凝沉淀试验,确定了聚合氯化铝和聚丙烯酰胺的最佳脱浊投加量分别为  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,此时试验出水浊度不足 1 NTU;考虑

到进水中氟化物略微超标,通过原水复配氟化钠至设计最大值  $1.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  并开展混凝试验,最终获取了聚合氯化铝和聚丙烯酰胺除氟时的最佳投加量分别为  $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,此时试验出水氟化物能够控制在  $0.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以内。

工程自正式投运以来,运转效果良好,各项指标均达到了设计要求,矿井水的运行吨水处理成本约  $0.34 \text{ 元}^{[18]}$ 。工程主要经济技术指标见表 3。

图 2、3、4、5 给出了 2020 年 5 月连续 15 天主要处理单元对污染物的去除效果。

表 3 主要经济技术指标

Table 3 Main economic and technical indicators

项目	指标
单位水量用地指标	$0.18 \text{ m}^2/\text{m}^3$
单位水量能耗	$0.187 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$
单位水量运行成本	药剂 $0.172 \text{ 元}/\text{m}^3$
	动力 $0.109 \text{ 元}/\text{m}^3$
	人工 $0.024 \text{ 元}/\text{m}^3$
	维修 $0.033 \text{ 元}/\text{m}^3$
	总运行成本 $0.338 \text{ 元}/\text{m}^3$
单位水量投资成本	$787 \text{ 元}/\text{m}^3$

辐流预沉池对高悬浮物矿井水的自然预沉效果较高,从图 2 中可以看出,在辐流预沉池进水 SS 平均质量浓度为  $3342 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,出水平均 SS 为  $863 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,SS 平均去除率达到了 72.5%。在第 12 天时,矿井水处理系统总进水 SS 达到了  $10800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,预计此时应该是井下在清理水仓,此时的 SS 去除率达到了 76.1%,分析认为这

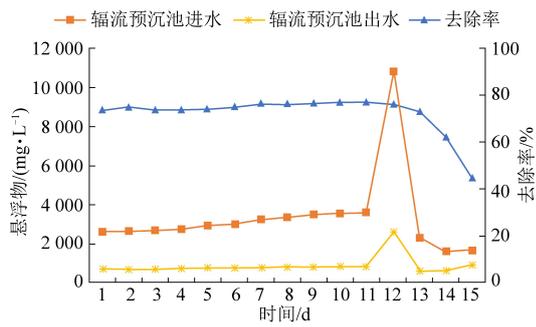


图2 辐流预沉池对悬浮物的去除效果

Fig. 2 Removal of suspended solid in the radial flow sedimentation tank

与煤矿清水仓时,矿井水中的悬浮物粒径大、自然沉降速度快有关。

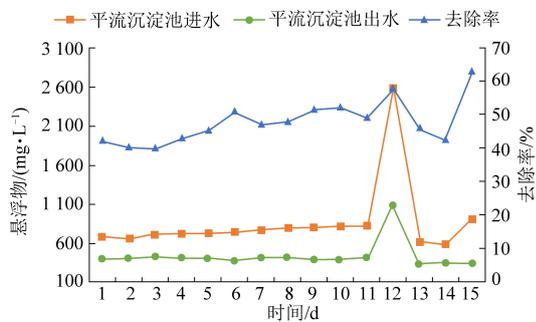


图3 平流沉淀池对悬浮物的去除效果

Fig. 3 Removal of suspended solid in the horizontal flow sedimentation tank

平流预沉池虽然停留时间比辐流预沉池长,但由于进水中的颗粒物粒径已经变得很细小,对SS的去除率比辐流预沉池要低,从图3中可以看出,平流沉淀池进水SS平均质量浓度为862.8 mg·L<sup>-1</sup>时,出水平均SS为429.8 mg·L<sup>-1</sup>,SS平均去除率仅为48.3%。

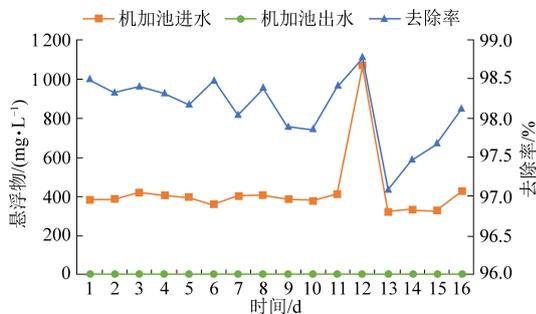


图4 机械加速澄清池对悬浮物的去除效果

Fig. 4 Removal of suspended solid in the mechanical accelerated clarifier

机械加速澄清池是一种泥渣循环型澄清池,具有处理效率高、对水质和水量冲击负荷适应能力强、药耗低的特点,是本项目的核心处理设施,

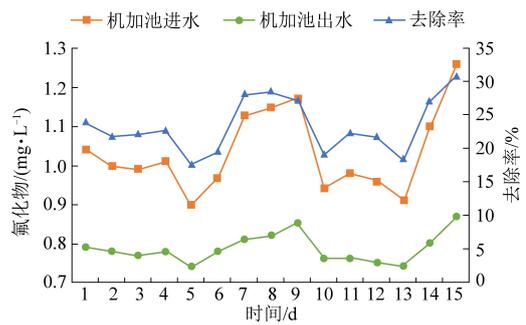


图5 机械加速澄清池对氟化物的去除效果

Fig. 5 Removal of fluoride in the mechanical accelerated clarifier

从图4中可以看出,在进水SS平均质量浓度为429.80 mg·L<sup>-1</sup>时,出水平均SS为7.60 mg·L<sup>-1</sup>,SS平均去除率高达98.1%,在进水SS高达1070 mg·L<sup>-1</sup>时,出水SS依然只有12.8 mg·L<sup>-1</sup>。

机械加速澄清池能够在本项目中实现氟化物和悬浮物的协同去除,从图5中可以看出,在聚合氯化铝和聚丙烯酰胺投加量分别为80 mg·L<sup>-1</sup>、0.8 mg·L<sup>-1</sup>时,矿井水中的氟化物平均去除率为23.54%,氟化物能够从1.26 mg·L<sup>-1</sup>降至0.87 mg·L<sup>-1</sup>。悬浮物和氟化物在机械加速澄清池内实现协同去除的机理如下:聚合氯化铝和矿井水中的微小颗粒物(煤粉和岩粉)进行絮凝反应时形成的Al(OH)<sub>3(am)</sub>絮体能够对氟离子产生氢键吸附和交换,使氟离子得以污泥的形式去除;同时氟离子能够和Al<sup>3+</sup>形成AlF<sup>2+</sup>到AlF<sup>6-</sup>等多种络合物,并在混凝过程中形成铝氟络合物(AlF<sub>x</sub>(OH)<sub>(3-x)</sub>和Na<sub>(x-3)</sub>AlF<sub>x</sub>)进行絮凝沉淀,或通过新生成的Al(OH)<sub>3(am)</sub>絮体的网捕卷扫作用共同沉降<sup>[19-20]</sup>。

### 5 结 语

(1)两级预沉工艺(辐流预沉+平流沉淀)对高悬浮物矿井水的预沉效果较高,在矿井水进水SS平均质量浓度高达3342 mg·L<sup>-1</sup>的情况下,两级预沉后的出水平均SS降至429 mg·L<sup>-1</sup>,平均去除率达到了87.2%。

(2)经过改良后的机械加速澄清池能够获得较好的氟化物和SS协同去除效果,在聚合氯化铝和聚丙烯酰胺投加量分别为80 mg·L<sup>-1</sup>、0.8 mg·L<sup>-1</sup>时,对SS的平均去除率达到了98.14%,并能将氟化物从1.26 mg·L<sup>-1</sup>降至0.87 mg·L<sup>-1</sup>,矿井水中氟化物的去除率达到了31.0%

(3)“两级预沉+机械澄清+均质过滤”工艺对

高悬浮物含氟矿井水的整体处理效果较好,出水氟化物稳定达到了《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)Ⅲ类水质标准,出水SS稳定控制在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内。工程吨水药剂处理成本不足0.21元,具有很好的经济性和示范性。

#### 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 孙亚军,陈歌,徐智敏,等.我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J].煤炭学报,2020,45(1):304-316.  
SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, et al. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 304-316.
- [3] 高亮,周如禄,徐楚良,等.煤种与煤矿矿井水水质特性之间的相关性探讨[J].能源环境保护,2004,18(6):46-48.  
GAO Liang, ZHOU Rulu, XU Chuliang, et al. Discussion on the relation between coal species and the characteristics of quality of mine drainage[J]. Energy Environmental Protection, 2004, 18(6): 46-48.
- [4] 何绪文,钱大益,谭远斌,等.高浊度矿井水水质特征[J].北京科技大学学报,2008,30(8):844-847.  
HE Xuwen, QIAN Dayi, TAN Yuanbin, et al. Quality characteristics of mine drainage with high turbidity[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(8): 844-847.
- [5] 虎维岳,闫丽.对矿井涌水量预测问题的分析与思考[J].煤炭科学技术,2016,44(1):13-18+38.  
HU Weiyue, YAN Li. Analysis and consideration on protection problems of mine water inflow volume [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 13-18+38.
- [6] 刘鸿志,王光镇,马军,等.黄河流域水质和工业污染源研究[J].中国环境监测,2021,37(3):18-27.  
LIU Hongzhi, WANG Guangzhen, MA Jun, et al. Water quality status and industrial pollution source in the yellow river basin [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(3): 18-27.
- [7] 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 water comprehensive utilization and current situation of northwest[J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(5): 60-63.
- [8] 郭雷,张璐,胡婵娟,等.我国矿井水管理现状分析及对策[J].煤炭学报,2014,39(S2):484-489.  
GUO Lei, ZHANG Luo, HU Chanjuan, et al. Status analysis and measures taken for mine water anagement in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 484-489.
- [9] 高亮.我国煤矿矿井水处理技术现状及其发展趋势[J].煤炭科学技术,2007,35(9):1-5.  
GAO Liang. Status of technology for processing mine water and its trend in China[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(9): 1-5.
- [10] 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 Resource and Water Engineering, 2008, 19(5): 50-57.
- [11] 毕翀宇,李日强,刘娜,等.煤矿矿井水的混凝处理[J].安全与环境学报,2009,9(1):27-29.  
BI Chongyu, LI Riqiang, LIU Na, et al. Study on the coagulation treatment of coalmine drainage [J]. Journal of Safety and Environment, 2009, 9(1): 27-29.
- [12] 李福勤,贾玉丽,孟立,等.高悬浮物矿井水混凝试验及应用[J].能源环境保护,2016,30(3):20-22.  
LI Fuqin, JIA Yuli, MENG Li, et al. Coagulation test and application of the high suspended solids mine water [J]. Energy Environmental Protection, 2016, 30(3): 20-22.
- [13] 谭金生,黄昌凤,郭中权.高悬浮物高矿化度矿井水处理工艺及工程实践[J].能源环境保护,2013,27(3):30-32+42.  
TAN Jinsheng, HUANG Changfeng, GUO Zhongquan. Treatment process and engineering practice for mine drainage water with high suspended solids and high salinity [J]. Energy Environmental Protection, 2013, 27(3): 30-32+42.
- [14] 章丽萍,何绪文,张先,等.高浊度矿井水处理技术研究[J].矿业安全与环保,2008,35(6):14-16.  
ZHANG Lipin, HE Xuwen, ZHANG Xian, et al. Study on treatment technology for high-turbidity mine water [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2008, 35(6): 14-16.
- [15] 高杰,周如禄,郑彭生.高浊度矿井水处理中混凝剂投加方式研究[J].煤炭科学技术,2015,43(3):142-145.  
GAO Jie, ZHOU Rulu, ZHENG Pengsheng. Study on feeding mode of coagulant in high turbidity mine water treatment [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3): 142-145.
- [16] 陈永春,高杰,谢豪,等.含特殊悬浮物矿井水正交混凝试验研究[J].能源环境保护,2013,27(1):17-20.  
CHEN Yongchun, GAO Jie, XIE Hao, et al. Investigation of orthogonal experiments of coagulation for mine drainage water with particular suspended solids [J]. Energy Environmental Protection, 2013, 27(1): 17-20.
- [17] 郭德,吴大为,张秀梅.高浓度矿井水的处理方案与实践[J].工业水处理,2003,23(5):55-56.  
GUO De, WU Dawei, ZHANG Xiumei. Scheme and practice of the treatment of mine water with high concentration [J]. Industrial Water Treatment, 2003, 23(5): 55-56.
- [18] 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.

- 125-126.
- [19] 董润坚, 李健, 胡浩, 等. 高氟地下水处理工艺技术的试验[J]. 净水技术, 2018, 37(6): 49-53.
- DONG Runjian, LI Jian, HU Hao, et al. Experiment of technological process for high fluoride-containing groundwater[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(6): 49-53.
- [20] 卢建杭, 刘维屏, 郑巍. 铝盐混凝去除氟离子的作用机理探讨[J]. 环境科学学报, 2000, 20(6): 709-713.
- LU Jianhang, LIU Weiping, ZHENG Wei. The removal mechanisms of fluoride ion by aluminum salt coagulant [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(6): 709-713.