节能环保与综合利用

# 钢铁工业高盐废水来源及零排放技术对比

杨本涛，冯哲愚，叶恒棣，魏进超，刘彦廷

（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙 410205）

**摘要**：随着钢铁工业的绿色发展，氯元素处置的问题开始凸显，其最终变为高盐废水的处置问题。本文系统梳理了钢铁工业高盐废水的主要来源及特征，并详细对比高盐废水零排放处置技术中冲渣法、烟道余热蒸发法、蒸发结晶分盐法的优缺点。结果表明，高盐废水主要来源于工序环保设施产生的副产物、生产提质及含盐固废的预处理；在不返回生产工序和回用的前提下，蒸发结晶分盐法能够有效地回收氯资源，不产生二次污染，但应重点关注成本高和堵塞问题。本文研究结论可为钢铁工业高盐废水的减排提供重要依据。

**关键词**：高盐废水；来源及特征；零排放技术

**中图分类号**：X703.1；TF089 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)04－0077－06

**doi**：10.13403/j.sjqt.2022.04.057

# High-salt wastewater sources in steel industry and comparison on zero-discharge technologies

**YANG Bentao，FENG Zheyu，YE Hengdi，WEI Jinchao，LIU Yanting**

（1. *Zhongye Changtian International Engineering Co.，Ltd.，Changsha* 410205，*Hunan*，*China*；2. *National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System*，*Changsha* 410205，*Hunan*，*China*）

**Abstract**：With the green development of the iron and steel industry，the problem of chlorine element disposal starts to be highlighted，which eventually becomes the disposal of high-salt wastewater. The main sources and characteristics of high-salt wastewater in the iron and steel industry are systematically sorted out，and the advantages and disadvantages of the slag flushing method，the flue waste heat evaporation method，and the evaporative crystallization salt separation method in the zero-discharge treatment technology of high-salt wastewater are compared in details. The results show that the high-salt wastewater mainly comes from by-products produced by environmental protection facilities in the process，production upgrading and pretreatment of salt-containing solid waste；on the premise of not returning to the production process and recycling，the evaporative crystallization and salt separation method can effectively recover Chlorine resources without secondary pollution，but problems of high cost and clogging should be focused on. The research conclusions can provide an important basis for the emission reduction of high-salt wastewater in the iron and steel industry.

**Key words**：high-salt wastewater；sources and characteristics；zero-discharge technology

随着“十四五规划”和“3060双碳目标”的不断推进，我国经济进入了从“量”往“质”发展的新阶段。作为国民经济可持续发展的重要基础产业，钢铁行业面临由“钢铁大国”向“钢铁强国”的技术转型。随着我国生态环境承载力接近饱和，行业节能减排和技术升级对于整个钢铁

**收稿日期**：2021－09－30；**修回日期**：2021－11－18

**基金项目**：长沙市科技领军人才(kh2005005)；高新技术产业科技创新引领计划(2020GK4095)

**作者简介**：杨本涛(1989—)，男，博士，高级工程师，从事工业三废治理及资源化研究。

**通信作者**：魏进超(1981—)，男，博士，教授级高级工程师，从事钢铁烧结节能减排、烟气多污染物深度协同净化、冶金固废资源化利用等研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

工业转型具有引领作用。新时期的环境要求下，钢铁冶炼三废治理逐步朝着“烟气粉尘超低排放、固废不出厂、废水零排放”的目标转变。根据钢铁工业的物质流分析，Fe、S、N、C等元素均实现了资源化或无害化，但氯元素一直未得到有效消纳和关注。

传统方法中氯元素通常随冲渣工艺进入渣中或者直接返回生产工序，没有得到妥善处置。但大量的氯元素富集，不仅会导致生产设备腐蚀，还会增加废水处理的难度。此外，大量的氯元素可能会转化为氯化氢，而氯化氢不仅会占据烟气净化催化剂的有效位点，还会和喷入的氨水形成氯化铵，进而氯化铵逃逸在烟气中形成有色烟羽，直接威胁生态环境质量和超低排放效果。因此，在新的环保要求下，氯元素处置的问题开始凸显。

通过对氯元素的物质流分析，氯最终将进入废水中，转变为高盐废水问题。本文围绕钢铁工业绿色发展的需求，通过梳理钢铁工业高盐废水的来源，并对比目前常用的几类高盐废水“零排放”处理技术，以期可为钢铁工业的绿色化发展提供基础支撑。

# 1 典型高盐废水来源及危害

## 1.1 高盐废水来源及特征

### 1.1.1 湿法脱硫废水

湿法脱硫废水来源于采用石灰石浆液进行烟气脱硫时，为防止系统中氯离子富集，而定期排放的废水[1]。对于联合钢厂，氯主要来源于烧结烟气的湿法脱硫。该废水呈弱酸性，pH值一般为4~6，吨铁排放量为10~15 L。

由于钢铁系统建成的烧结湿法烟气脱硫装置大多是借鉴燃煤电厂湿法脱硫工艺[2]。因此，其水质与燃煤电厂湿法脱硫废水类似，均为高盐废水，氯离子质量浓度一般达到20 g/L，硫酸根离子质量浓度一般大于3 g/L，且含有较高质量浓度的钙、镁，硬度可达8 g/L(以$CaCO_3$计)以上。此外，由于烧结烟气中含有部分粉尘，它会在湿法脱硫过程被脱除，进而发生溶解而带入大量的氨氮和重金属铊，其氨氮质量浓度在1 000 mg/L左右，铊质量浓度在10 mg/L以上。最终，其演变为含高重金属(铊)、高盐、高氨氮、高硬度及含一定质量浓度COD的复杂难处理废水[3]，其水质如表1所示。

**表1 烧结湿法脱硫废水水质**

**Table 1 Water quality of wastewater from wet desulfurization of the sintering flue gas** **mg/L**

| 氯离子 | 硫酸根 | 氟离子 | 氨氮 | 钙离子 | 镁离子 | 铊 | COD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15 000~30 000 | 2 000~8 000 | 10~200 | 500~2 000 | 1 000~4 000 | 2 000~6 000 | 10~50 | 500~3 000 |

### 1.1.2 活性炭法酸性洗涤废水

活性炭吸附了烟气污染物后，可通过高温进行解吸再生，再生后的活性炭返回吸附塔循环使用。在高温解吸过程中会产生含高体积分数的二氧化硫(7%~15%)，其为酸性高温富硫气体。为保证硫资源回收系统的稳定性，工序需采取洗涤法对富硫气体进行洗涤除杂，由此产生了酸性洗涤废水[4-5]。其废水呈强酸性，pH值一般为1~2，吨铁排放量为2~5 L。

由于富硫气体来源于活性炭加热解析，因此其成分主要为低沸点或高挥发性的物质，这使得酸性洗涤废水的成分相对湿法脱硫废水来说，会更加单一，基本不含金属离子。如铁离子质量浓度低于200 mg/L，铅离子质量浓度低于5 mg/L；但还有一部分硬度，钙镁离子质量浓度平均为100 mg/L左右。此外，该废水盐度较高，氯离子质量浓度一般达到50 g/L，硫酸根离子质量浓度一般大于3 g/L，氟离子质量浓度一般大于500 mg/L[6]。其水质如表2所示。

### 1.1.3 全厂综合废水回用浓盐水

钢铁企业综合污水处理与回用是实现有效节水的重要指施。为保障回用水质量，一般采用高压反渗透进行废水脱盐处理，经过脱盐处理后，大部分可进行返钢铁冶炼工艺使用，但同时会产生一部分浓盐水。浓盐水污染物质量浓度高、含盐量高，直接排放不能达到排放标准，常规的生化处理难度大。浓盐水一般呈弱碱性，pH值为7~8，吨铁排放量15~25 L。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　活性炭法酸性洗涤废水水质

Table 2　Water quality of acid washing wastewater by activated carbon method　　mg/L

| 氯离子 | 硫酸根 | 氟离子 | 氨氮 | 钙离子 | 镁离子 | 铊 | COD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 000 ~ 60 000 | 3 000 ~ 6 000 | 500 ~ 2 000 | 500 ~ 20 000 | 50 ~ 200 | 50 ~ 200 | 0. 1 ~ 1 | 2 000 ~ 4 000 |

注: 氨氮质量浓度与活性炭法喷氨量有关。

由于浓盐水来源较为单一，其污染物相对来说较简单，其中阳离子以钠离子为主，存在一定的硬度，其他杂质较少。阴离子主要由氯离子和硫酸根组成，为高氯、低硫酸根废水，其氯离子质量浓度约为 50 g/L[7-8]。其水质如表 3 所示。

表 3　全厂循环冷却水浓盐水水质

Table 3　Water quality of concentrated brine for circulating cooling water in the whole plant　　mg/L

| 钙离子 | 氯离子 | 硫酸根 | 氟离子 | COD |
|---|---|---|---|---|
| 10 ~ 200 | 30 000 ~ 80 000 | 200 ~ 1 000 | 100 ~ 200 | 100 ~ 5 000 |

1. 1. 4　高盐固废洗灰水

随着《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的实施，钢铁企业产生的固废处置面临巨大挑战。据统计，钢铁生产时将产生占钢量约 10% 的含铁粉尘，全国年产出量达 8 000 万吨。除部分被钢铁系统自循环回收外，仍有约 50% 的诸如烧结机头灰、提铁减锌表冷灰等因重金属和碱金属含量高而需单独处理。

烧结机头灰来源于烧结过程中，烧结机机头排出的粉尘，粉尘一般通过多级电除尘器去除和收集。其中电除尘器后前端收集的机头灰氯质量分数不高，可直接返回烧结配料。后端收集得到的灰，虽然其中含有 15% 左右的铁，具有回收的价值，但氯质量分数较高，一般为 20%~30%，主要以 KCl 形式存在。据统计，后端的烧结机头灰吨铁产生量为 2 ~ 5 kg[9-10]。提铁减锌表冷灰主要来源于采用回转窑或转底炉对高炉布袋灰进行锌富集过程中产生的粉尘，粉尘通过表冷器降温后实现收集。其含有 21% 左右的氧化锌，具有回收的价值，但同时含有 10%~20% 的氯，主要以 NaCl 形式存在。据统计，提铁减锌表冷灰的吨铁产生量为 3 ~ 8 kg。除了钢铁厂内部产生的高盐固废外，随着冶金炉窑功能价值的提升，钢铁冶炼也承担着消纳社会废弃物的责任，从而会带入大量的含氯固废[11]。如，烧结机协同处理垃圾焚烧飞灰时，灰中含有 10%~20% 的氯，其主要以 NaCl 形式存在。

固废中氯质量分数较高，直接返回烧结等火法处理，会造成设备腐蚀。因此，需要通过水洗脱氯的方式进行固废的预处理。水洗工序一般为三级逆流工艺，可实现含氯固废中氯离子低于 2%，但由此该过程会产生大量高质量浓度的含盐废水，其 pH 值为 5 ~ 9；且污染物较为复杂，含有较高浓度钾钠离子，以及含有高浓度的钙镁及重金属[12-13]。阴离子主要由氯离子和硫酸根组成，为高氯、低硫酸根废水，其氯离子质量浓度一般大约为 100 ~ 160 g/L[14]。其水质如表 4 所示。

表 4　高盐固废洗灰水水质

Table 4　Water quality of high-salt solid waste washing water　　mg/L

| 钙离子 | 氯离子 | 硫酸根 | 铅离子 | COD |
|---|---|---|---|---|
| 2 000 ~ 20 000 | 100 000 ~ 160 000 | 2 000 ~ 5 000 | 50 ~ 200 | 1 000 ~ 5 000 |

## 1. 2　高盐废水的危害

高盐盐水具有污染物质量浓度高、含盐种类多且量大、硬度高的水质特点，常规的生化处理难度较大。一般通过物化法进行深度处理，如高级氧化、膜浓缩。处理后的废水主要含有钠和氯离子，一般处置方式为将该股废水掺入

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

烧结进行配料消纳[15]，但这种方法长期使用会造成氯离子在系统累积，造成设备腐蚀、结瘤等工艺危害。如果将该高盐废水处理达标后直排放，会造成土壤板结、水分流失。直接排入海水中会导致局部溶解氧降低，对生物造成危害。

为加强高盐废水管控，废水“零排放”及资源化要求日趋严格。2021年1月12日，十部委联合发布《关于推进污水资源化利用的指导意见》，提出积极推动工业废水资源化利用。推进企业内部工业用水循环利用，提高重复利用率。

## 2 高盐废水零排放处置方法及比较

### 2.1 高盐废水零排放处置方法

#### 2.1.1 冲渣法

高炉渣、钢渣需要在一定压力、水量的水流冲击下，将1 500 ℃左右的液态熔渣淬化成颗粒状，而在此过程中水会被蒸发，废水中剩余的盐进入渣中。冲渣法顾名思义就是将高盐废水排入渣池[9]，然后利用渣的热量实现高盐废水的处理。由于冲渣对水质要求较低，因此，高盐废水通过简单处理后即可用作冲渣水。由于该方法成本低，高盐废水冲渣也是目前钢厂最为常用的方法之一。

由于冷却后的高炉渣、钢渣主要用于建筑原料，当其中氯离子过高后，会对其使用造成潜在威胁。为规范高炉渣、钢渣的利用方法，2019年住建部颁布了《钢铁渣处理与综合利用技术标准》(GB/T 51387—2019)，其明确指出：渣中氯质量分数应小于0.06%。因此，在新的标准规范要求下，采用冲渣法处理高盐废水存在着一定的局限性。使用过程中需要核算和检测采用高盐废水冲渣后，渣中氯质量分数的变化，以确保其满足要求。

#### 2.1.2 烟道余热蒸发法

考虑到烟气具有一定余热，可将废水雾化后喷入具有一定温度的烟道中，利用烟气的余热将废水蒸发转化为结晶盐，然后通过除尘器捕集，实现高盐废水的处理。目前，利用烟气余热蒸发废水的技术主要在燃煤电厂应用，涉及的干燥模式主要有主烟道烟气蒸发和旁路烟气蒸发两种[16-17]。

由于高盐废水蒸发需要一定的烟气温度，同时还会产生一定量的结晶盐。根据钢铁工业烟气特征分析，具备烟道余热蒸发废水的烟气主要有烧结大烟道、烧结环冷机烟气、焦化大烟道尾气[18]。经计算[19]，取10%环冷机烟气量即可实现4 $m^3$/h高盐水的蒸发，其烟气温度平均会降低150 ℃。

该方法主体设备为雾化喷嘴、除尘器及压缩空气机，具有流程短、运行费用低、废水零排放的优点。但由于高盐废水往往较为复杂，得到的结晶盐通常为杂盐，需要进一步的外运处置。

#### 2.1.3 蒸发结晶分盐法

蒸发结晶分盐法主要利用高盐废水中各类盐溶解度随温度变化不同的特征，从而实现结晶盐的分离，其在化工行业应用比较成熟。针对$Na_2SO_4$、NaCl为主的废水，由于硫酸钠的溶解度随温度变化较为明显，可采用热法盐硝联产工艺和冷冻脱硝联产工艺进行分离[20-21]，如湿法脱硫废水、活性炭法制酸废水、浓盐水。针对KCl、NaCl为主的废水，如烧结机头灰洗灰水、垃圾焚烧飞灰洗灰水，可基于氯化钾的溶解度随温度变化具有明显变化的特点进行分离，常采用50/100 ℃的变温蒸发[22-23]，根据其钾钠比的变化，可选择顺流蒸发和逆流蒸发两种。

蒸发结晶分盐法虽然能回收高纯的氯盐，实现氯元素的资源化。但应用于钢铁工业高盐废水处理还存在运行费用高和运行故障率高的问题。钢铁各工序生产过程中产生的工业废水通常汇总于总排水口，进行统一处理。这会导致废水量大，从而稀释水中盐分的质量浓度，这使得处理过程中需要多次浓缩，从而增加废水的运行成本。此外，钢铁流程较长，各工序运行状况不一致，废水汇总到一起后，存在水质波动较大的问题，易造成结晶运行不稳定、产物纯度不高等难题。

为解决上述难题，不少学者提出“钢铁厂废水分级、分质循环协同利用”和“多组分高盐废水协同蒸发”的技术路线，通过富集废水盐浓度和多套蒸发器共用，提高能源效率，降低运行

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成本，如采用湿法脱硫废水进行烧结灰的水洗。

### 2.2　高盐废水零排放技术对比

各高盐废水零排放方法对比如表 5 所示。由表 5 可知，冲渣法具有运行费用低、投资低的优势，但存在可能导致渣中氯超标的风险；而烟道余热蒸发法具有操作简单的优势，在电厂应用较广，缺点是为会产生大量的含盐固废，以及对于喷雾流场的控制要求较为严格；对于蒸发结晶法，其具有能实现氯元素资源化的优势，但存在成本高、操作复杂的不足。综上，在高盐废水不回用工序和外排的前提下，蒸发结晶分盐法具有回收氯资源的显著优势，不会造成二次污染，但在实际应用过程中，应重点关注降本增效与结晶堵塞的问题。

**表 5　零排放方法对比**

**Table 5　Comparison of zero emission methods**

| 方法名称 | | | 原理 | 简易程度 | 投资成本 | 运行费用 | 缺点 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 冲渣法 | | | 渣废热 | 简单 | 低 | 低 | 渣中氯超标 |
| 烟道余热蒸发法 | | | 烟气余热 | 简单 | 中 | 低 | 杂盐固废 |
| 蒸发结晶分盐法 | $Na_2SO_4$、NaCl 体系 | 热法盐硝联产 | 蒸发 | 简单 | 高 | 中 | 操作难度大 |
| | | 冷冻脱硝联产 | 蒸发－冷却 | 中等 | 高 | 高 | 成本高 |
| | KCl、NaCl 体系 | 顺流蒸发低温析钾 | 蒸发－冷却 | 中等 | 高 | 高 | 抗波动能力差 |
| | | 逆流高温析钠盐 | 蒸发－冷却 | 中等 | 高 | 高 | 钠盐品质较低 |

## 3　结　语

(1) 随着环保标准的日趋严格，钢铁工业的高盐废水处理问题逐步凸显，氯离子的资源化对于发展绿色钢铁具有重要意义。

(2) 钢铁工业主要的高盐废水来源有烧结湿法脱硫废水、活性炭法酸性洗涤废水、全厂综合废水回用浓盐水、高盐固废洗灰水，其中前两类废水来源于工序环保设施产生的副产物，第三类废水来源于生产提质，第四类废水来源于固废的预处理。

(3) 高盐废水不能回用工序和外排，常用的高盐废水零排放技术包括冲渣法、烟道余热蒸发法、蒸发结晶分盐法。相比于其他两类方法，蒸发结晶分盐法具有能实现高盐废水中氯元素资源化的优势，不会造成二次污染。但需要进一步降低运行成本及攻克蒸发过程的堵塞情况。

**参考文献:**


[1] 邓芳，周鹏飞，秦峰，等. 新钢烧结烟气脱硫系统的运行优化[J]. 金属材料与冶金工程，2016(4)：15－19.
DENG Fang，ZHOU Pengfei，QIN Feng，et al. Operation optimization of sintering flue gas desulfurization system of Xingang Steel[J]. Metallic Materials and Metallurgical Engineering，2016(4)：15－19.

[2] 潘莉，陈亮，董进. 烧结湿法烟气脱硫废水深度处理流程探讨[J]. 冶金动力，2016(1)：53－56.
PAN Li，CHEN Liang，DONG Jin. Discussion on the advanced treatment process of sintering wet flue gas desulfurization wastewater[J]. Metallurgical Power，2016(1)：53－56.

[3] 高丕强，葛程程. 钢铁企业湿法脱硫废水零排放处理技术研究与展望[J]. 矿业工程，2021，19(3)：56－60.
GAO Piqiang，GE Chengcheng. Research and prospect of zero discharge treatment technology of wet desulfurization wastewater in iron and steel enterprises[J]. Mining Engineering，2021，19(3)：56－60.

[4] 杨本涛，彭杰，何凯琳，等. 脱硫脱硝制酸废水中 S 的形态及其去除研究[J]. 烧结球团，2020，45(2)：56－60.
YANG Bentao，PENG Jie，HE Kailin，et al. Study on the form and removal of S in desulfurization and denitrification sulphuric acid wastewater[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(2)：56－60.

[5] 杨本涛，赵利明，彭杰，等. 气态膜在烧结脱硫脱硝制酸废水处理中的应用[J]. 水处理技术，2021，47(4)：125－127；132.
YANG Bentao，ZHAO Liming，PENG Jie，et al. Application of gaseous membrane in the treatment of sintering desulfurization and denitrification sulphuric acid wastewater treatment[J]. Water Treatment Technology，2021，47(4)：125－127；132.

[6] 高丕强，杨驰，王兴文. 活性焦烟气净化系统制酸废水零排放处理工艺研究[J]. 矿业工程，2020，18(3)：57－58；61.
GAO Piqiang，YANG Chi，WANG Xingwen. Research on zero discharge treatment process of sulfuric acid wastewater from activated coke flue gas purification system[J]. Mining Engi-


(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

neering,2020,18(3):57-58;61.

[7] 邓平,巩磊,郑云霞. 钢铁企业污水深度处理后浓盐水处理实践[J]. 中国冶金,2018,28(10):67-71.
DENG Ping,GONG Lei,ZHENG Yunxia. Practice of concentrated brine treatment after advanced sewage treatment in iron and steel enterprises[J]. China Metallurgy,2018,28(10):67-71.

[8] 韩继玉,吕学强,徐宝臣. 利用高炉冲渣水废热处理高盐废水可行性分析[J]. 山东冶金,2020,42(5):44-45.
HAN Jiyu,LU Xueqiang,XU Baochen. Feasibility analysis of heat treatment of high-salt wastewater using blast furnace slag flushing water waste[J]. Shandong Metallurgy,2020,42(5):44-45.

[9] 唐鸿鹄,赵立华,韩海生,等. 铁矿烧结烟尘特性及综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用,2019,39(3):88-98.
TANG Honghu,ZHAO Lihua,HAN Haisheng,et al. Research progress on characteristics and comprehensive utilization of iron ore sintering dust[J]. Mineral Resources Protection and Utilization,2019,39(3):88-98.

[10] 张福利,彭翠,郭占成. 烧结电除尘灰提取氯化钾实验研究[J]. 环境工程,2009(S1):337-340.
ZHANG Fuli,PENG Cui,GUO Zhancheng. Experimental study on extraction of potassium chloride from sintering electrostatic precipitator ash[J]. Environmental Engineering,2009(S1):337-340.

[11] 叶恒棣,李谦,魏进超,等. 一种固废协同烧结、球团的处置工艺:202110414505.2[P]. 2021-07-23.
YE Hengdi,LI Qian,WEI Jinchao,et al. A solid waste co-sintering and pellet disposal process:202110414505.2[P]. 2021-07-23.

[12] 秦立浩,墙蔷,阳红辉,等. 烧结机头电除尘灰的分级利用[J]. 钢铁研究学报,2020,32(9):802-808.
QIN Lihao,QIANG Qiang,YANG Honghui,etc. Classification and utilization of electrostatic precipitator ash from sintering machine head[J]. Journal of Iron and Steel Research,2020,32(9):802-808.

[13] 唐卫军,张德国,武国平,等. 烧结机头电除尘灰资源化利用技术[J]. 现代矿业,2017(9):188-191.
TANG Weijun,ZHANG Germany,WU Guoping,et al. Resource utilization technology of electric dust removal ash for sintering head[J]. Modern Mining,2017(9):188-191.

[14] 王雨婷. 炉排炉垃圾焚烧飞灰的水洗脱氯及二噁英降解试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
WANG Yuting. Experimental study on water elution of chlorine and dioxin degradation of waste incineration fly ash from grate furnace[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2019.

[15] 岳丽芳,王春慧,韩一杰,等. 钢铁企业浓盐水处理回用工程实例[J]. 中国给水排水,2020,36(22):156-159.
YUE Lifang,WANG Chunhui,HAN Yijie,et al. Examples of concentrated brine treatment and reuse projects in iron and steel enterprises[J]. China Water & Wastewater,2020,36(22):156-159.

[16] 黄逸君,陈全震,曾江宁,等. 海水淡化排放的高盐废水对海洋生态环境的影响[J]. 海洋学研究,2009,27(3):103-110.
HUANG Yijun,CHEN Quanzhen,ZENG Jiangning,et al. The impact of high-salt wastewater discharged from desalination on the marine ecological environment[J]. Oceanographic Research,2009,27(3):103-110.

[17] 康梅强. 脱硫废水烟道蒸发处理工艺系统设计与试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
KANG Meiqiang. Design and experimental research on the evaporation treatment process system of desulfurization wastewater flue[D]. Chongqing:Chongqing University,2013.

[18] 叶恒棣. 钢铁烧结烟气全流程减排技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
YE Hengdi. Full-process emission reduction technology of steel sintering flue gas[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2019.

[19] 杨本涛,王兆才,魏进超,等. 一种烧结机机尾烟气净化及废水协同处理的方法:201910692538.6[P]. 2019-07-30.
YANG Bentao,WANG Zhaocai,WEI Jinchao,et al. A method for purifying exhaust gas from sintering machine and co-processing wastewater:201910692538.6[P]. 2019-07-30.

[20] 杨骅,彭赛军. NaCl-$Na_2SO_4$-$H_2O$ 体系硝盐联产再创新工艺[J]. 盐业与化工,2014,43(2):9-12.
YANG Hua,PENG Saijun. Re-innovative technology for co-production of nitrate in NaCl-$Na_2SO_4$-$H_2O$ system[J]. Salt Industry and Chemical Industry,2014,43(2):9-12.

[21] 田立楠. 35 ℃氨存在条件下 NaCl-$Na_2SO_4$-$H_2O$ 三元体系相图的测定[J]. 化学工程,2002,40(1):9-10.
TIAN Linan. Determination of the phase diagram of the NaCl-$Na_2SO_4$-$H_2O$ ternary system in the presence of ammonia at 35 ℃[J]. Chemical Engineering,2002,40(1):9-10.

[22] 张梅,付志刚,吴滨,等. 钢铁冶金烧结机头电除尘灰中氯化钾的回收[J]. 过程工程学报,2014,14(6):979-983.
ZHANG Mei,Fu Zhigang,Wu Bin,et al. Recovery of potassium chloride from electrostatic precipitator ash of iron and steel metallurgy sintering machine head[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2014,14(6):979-983.

[23] 刘文权,裴中杰,白皓. 烧结除尘灰无害化和资源化综合利用技术创新与应用[N]. 世界金属导报,2015(2).
LIU Wenquan,Pei Zhongjie,Bai Hao. Technical innovation and application of harmless and resource-based comprehensive utilization of sintering dust removal ash[N]. World Metal Herald. 2015(2).

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net