烧结机头电除尘灰和脱硫废液的协同资源化利用

王 东[1]，王海波[2]，吕 扬[3]，杨领芝[2]，王 笑[1]，杨凤岭[3]，仪垂杰[2]
（1. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院，山东 青岛 266520；2. 青岛特殊钢铁有限公司，山东 青岛 466409；
3. 山东青冶节能产业研究院有限公司，山东 青岛 266071）

摘要：在钢铁联合企业中，富含 K、Na 元素的烧结机头电除尘灰与富含氯离子的烧结烟气湿法脱硫废液的资源化利用是制约烧结工序环保工作的难题。本文通过对脱硫废液与机头电除尘灰的特性进行研究，发现烧结机头电除尘灰中碱金属元素的摩尔浓度为 Cl 元素的 1.18 倍；在机头灰的浸出液除杂过程中还要进一步引入 Na 元素，进一步放大了氯离子总量与碱金属含量不匹配的问题。本文提出烧结机头电除尘灰和脱硫废液的协同资源化利用技术，采用富含氯离子的脱硫废液与烧结机头电除尘灰进行浸出试验；通过对浸出液进行除杂、脱色，并进行浓缩结晶，制取 KCl 和 NaCl 晶体。试验结果表明，脱硫废液与机头电除尘灰以 4∶1 的比例混合搅拌，不仅能够满足烧结机头电除尘灰浸出液中碱金属离子与氯离子的平衡需要，而且能够代替清水用于溶解机头灰，从而实现烧结烟气脱硫废液与机头电除尘灰的环保协同处置和资源化利用。按照 400 万吨的规模测算，烧结机每月可产生机头灰 600 t，应用新技术每月可生产 300 t 的 KCl、60 t 的 NaCl，每月经济效益约为 44.7 万元。

关键词：烧结电除尘灰；脱硫废液；KCl；NaCl；资源化利用；协同处置
中图分类号：TF09；TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)01－0106－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.01.015

Synergistic resource utilization of electric precipitator dusts and waste desulfate liquor of sintering head

WANG Dong[1], WANG Haibo[2], LÜ Yang[3], YANG Lingzhi[2], WANG Xiao[1],
YANG Fengling[3], YI Chuijie[2]
(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China; 2. Qingdao Special Iron & Steel Co., Ltd., Qingdao 466409, Shandong, China; 3. Shandong Qingye Energy Saving Industry Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: In iron & steel combined enterprises, the resource utilization of electric precipitator dusts of sintering head rich in K and Na elements and wet desulfurization waste liquid of sintering fume rich in Cl^- is a difficult problem restricting the environmental protection of sintering process. The characteristics of the waste desulfate liquor and the electric precipitator dusts of the head are studied, and it is found that the molar concentration of alkali metal elements in the electric precipitator dusts of the sintering head is 1.18 times that of Cl element, and the Na element is further introduced in the process of impurity removal in the leaching solution of the head ash, which further amplifies the problem of mismatch between the total amount of Cl^- and the content of alkali metals. The synergistic resource utilization technology of electric precipitator dusts and waste desulfate liquor of sintering head is proposed, and the leaching test of Cl^- rich waste desulfate liquor and electric precipitator dusts of sintering head is carried out, and KCl and NaCl crystals are prepared by removing impurities, decolorizing and concentrating crystallization of leaching solution. The results show that the waste desulfate

收稿日期：2022－06－24；**修回日期**：2023－02－16
基金项目：山东省重点研发计划资助项目(2020CXGC011204)
作者简介：王 东(1977—)，男，副教授，从事节能、环保工艺及智能装备领域的研究。

liquor and the electric precipitator dusts of the head are mixed and stirred at a ratio of 4∶1, which can not only meet the balance needs of alkali metal ions and Cl^- in the leaching solution of the electric precipitator dusts of the sintering head, but also replace the water for dissolving the ash of the head, so as to realize the environmental protection co-disposal and resource utilization of the sintering fume waste desulfate liquor and the electric precipitator dusts of the head. According to the scale of 4 million tons, the sintering machine can produce 600 tons of head ash per month, and the application of new technologies can produce 300 tons of KCl and 60 tons of NaCl per month, with a monthly economic benefit of about 447 000 yuan.

Key words: electric precipitator dusts of sintering; waste desulfate liquor; KCl; NaCl; resource utilization; co-processing

在钢铁烧结工序中，机头电除尘灰中 K 元素质量分数普遍为 17%～40%，每吨烧结矿产生的富 K 电除尘灰约为 1.5 kg[1]。烧结除尘灰除经常造成管道、台车箅条的缝隙被堵塞外，随烧结矿进入高炉后，其中的 K、Na 元素还会造成焦炭的热态冶金性能劣化，进而影响高炉顺行[2]。目前，钢铁企业针对烧结机头电除尘灰的付费处置模式已成为行业常态。烧结烟气脱硫废液是湿法脱硫（石灰－石膏法）工艺中定期开路外排的废液[3]，其因富含氯离子，不能直接被利用或外排。无论采用沉淀盐法、分离拦截法、离子交换法或氧化还原法进行环保处置，还是委托第三方处置都给将钢铁行业带来高昂的处理成本[4]。脱硫废液的环保危害主要包括两个方面：① 脱硫废液含有多种可溶于水的重金属和碱金属，直接排放会对土壤和水源造成严重污染，引起人、畜的慢性中毒；② 脱硫废液呈弱酸性，因富含氯离子在工业环保处置过程中会对设备产生严重腐蚀，而且处理成本高昂。由于以上两个因素，脱硫废液处理已成为钢铁企业普遍存在的环保难题。

针对机头电除尘灰的处理问题，张湘鹤等[5]对该除尘灰生产 KCl 等钾盐产品的相关工艺路线进行了总结，提出通过水洗脱 K、Na，再将滤渣与铁矿粉混合焙烧，然后经磁选提 Fe，酸碱浸出提 Zn、Pb、Ag 等有价金属的资源回收路线；卢伟佳等[6]分析认为，烧结机头除尘灰含有害元素 K、Cl、S，并且烧结矿中的 K 与 Cl 元素几乎都以 KCl 形式存在。目前以烧结机头电除尘灰为原料，提取 KCl 的研究已经非常成熟。而在脱硫废液处理方面，孙普[7]重点研究了脱硫废液的酸碱中和剂、重金属捕集剂和絮凝剂，证明了有机硫溶剂对重金属具有较好的处理效果；张梅等[8]提出了水洗脱 K→固液分离→除杂与脱色→固液分离→真空蒸发→冷却结晶的 KCl 回收新工艺，通过试验研究确定了获得高质量 KCl 产品的水洗脱 K 液的最佳蒸发体积浓缩比。此外，在溶液沸腾温度为120～160 ℃的范围内，以 50～60 r/min 的转速进行真空旋转蒸发，经结晶冷却所得的 KCl 产品的质量分数和回收率分别达 97.24% 和 65.25%。

综上，将烧结电除尘灰中的 K、Na 元素与脱硫废液中的 Cl 元素进行综合利用，制取高纯度的 KCl 显然是一项经济效益突出而又环保的发展方向。为此，本文对脱硫废液中的氯离子和机头电除尘灰中的 K 元素进行全面分析，探索两项有害元素的协同资源化利用技术；深入研究脱硫废液与机头电除尘灰的特性，提出两项固体废物的协同资源化处置工艺流程，核算制取 KCl 的经济效益，为降低企业经营成本，实现“废水零排放”做出有益探索。

1　物料特性

1.1　烧结机头电除尘灰

1.1.1　化学成分分析

在烧结过程中，混合料的温度为 1 300 ℃左右，所有碳酸盐类全部分解，S、Cl 等元素形成 SO_2、HCl 等易挥发气体与水蒸气、CO_2 等一起进入烟道；在干燥过程中，一部分混合料固体颗粒在高负压环境下进入抽风系统，大颗粒在主烟道被重力除尘器沉降下来，细颗粒被电除尘器捕获，只有约 20 mg/m^3 的粉尘进入脱硫、脱硝系统。

青岛某钢铁厂铁前系统配套 2 台 240 m^2 烧结机，每月机头电除尘灰总量为 400 t 左右。

该除尘灰的化学成分如表 1 所示。由表 1 可知：1$^{\#}$～4$^{\#}$电场除尘灰的Fe质量分数逐渐降低，

表1 机头电除尘灰的主要化学成分和氯离子质量分数

Table 1 Main chemical composition and Cl^- mass fraction of the electric dust removal ash of the sintering system %

电场	Fe	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	NaO	S	P	Cl^-
1#	23.35	1.94	6.34	0.87	1.34	19.97	4.72	1.70	0.026	19.98
2#	17.12	0.60	4.57	0.30	0.44	27.04	4.88	2.78	0.012	25.91
3#	10.40	0.66	2.78	0.32	0.44	33.82	5.14	3.61	0.013	25.81
4#	8.15	0.84	2.68	0.28	0.62	34.35	5.43	3.85	0.014	26.55

其中，1#电场除尘灰含铁量为23.35%，4#电场除尘灰最低仅为8.15%；而1#~4#电场除尘灰的K_2O质量分数逐渐升高，1#电场除尘灰最低为19.97%，4#电场除尘灰中氧化钾含量达到34.35%；1#电场除尘灰的氯离子质量分数明显偏低，2#~4#电场除尘灰中氯离子质量分数基本稳定在26%左右。

1.1.2 可溶性物分析

对烧结机头电除尘灰进行常温可溶性实验：用天平称取100 g除尘灰置于烧杯中，按照1∶4的比例加入蒸馏水，并用玻璃棒充分搅拌，过滤后干燥称量，得到残留物的质量为42.6 g。计算得到该除尘灰的溶解率为57.4%。而采用同样的操作方法，用脱硫废液代替蒸馏水溶解机头灰，得到其溶解率为51.6%。溶液的主要化学成分分析结果如表2所示。

表2 溶液中主要离子的质量分数

Table 2 The mass fraction of main ions in the solution %

除尘灰熔剂	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Fe^{3+}	Cl^-	SO_4^{2-}
脱硫废液	0.16	0.02	5.30	0.71	0.03	6.39	0.01
蒸馏水	0.15	0.02	5.29	0.68	0.03	5.01	0.01

对烧结机头电除尘灰的综合分析认为：作为环保除尘系统的回收粉尘，如果按照循环经济的思路直接回收至烧结配料室，重新参与烧结配料，会导致大量K、Na元素被固化在烧结矿内，而烧结矿占高炉炉料结构的75%以上，带入高炉内部的碱金属在高温下会劣化焦炭的热态性能，导致高炉顺行困难；同时，以钾盐为主体的可溶性盐的存在，是导致烧结机台车箅条缝隙出现糊堵的主要原因，进而导致烧结抽风系统的阻力倍增，最终影响烧结矿的产量和质量。因此，烧结机头电除尘灰不宜直接进入生产系统进行回收利用。

1.2 脱硫废液

在钢铁烧结生产过程中，脱硫废液中的Cl元素主要来自烟气净化系统中的补充水和脱硫剂[9]，其中：工业水中的氯离子质量分数约为0.015%~0.020%，脱硫剂中的氯离子质量分数约为0.007%（绝大部分氯离子来自烧结烟气中的HCl）。所有Cl元素在脱硫吸收塔内循环富集，导致脱硫系统水溶液里的氯离子浓度逐步增加，而被迫定期外排高氯水，以确保烟气净化系统的脱硫效率。

脱硫废液中各种离子、COD（化学需氧量）、悬浮物的含量以及pH值检测结果如表3所示。由表3可以看出，烧结烟气脱硫废液中氯离子质量分数最高达到1.15%。此外，脱硫废液在脱硫塔内循环的过程中，OH^-与脱硫废液中的Pb、Cu、Fe等绝大部分金属及重金属离子形成沉淀，SO_2^{2-}与$Ca(OH)_2$形成$CaSO_3$，经氧化转变为$CaSO_4\cdot 2H_2O$。由于$CaSO_4$为微溶物，其大部分在压滤机作业过程中与其他不溶物一起，以副产品石膏的形式被分离出来，进而成为建筑材料的原料来源。

2 烧结机头电除尘灰与脱硫废液协同处置方案

2.1 协同处置方案

传统的机头电除尘灰处置生产线都是采用工业水作为溶剂，加入定量除尘灰，充分搅拌后，对压滤后的滤液进行浓缩结晶，获取KCl和NaCl晶体。在整个生产过程中，氯离子含量都小于K、Na元素的含量。由表1结果可计算得到K、Na元素与Cl元素的物质的量之比为1.18。此外，梳理青岛某钢铁厂2019年1月—12月的烧结机头电除尘灰的化学成分分析报告，将K、Na元素与Cl元素的质量分数进行计算，得到其物质的量之比为1.35。由上述两组计算结果可知，以同等质量的机头灰为原料，想要通过浓缩结晶的方法生产出

表 3　脱硫废液中主要离子、COD、悬浮物质量分数和 pH 值

Table 3　The mass fraction of main ion, COD and suspended solids and the value of pH in desulfurization wastewater

质量分数/10^{-4}%									pH 值
Fe^{3+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	COD	悬浮物	
138	700	110	278	35	11 500	300	57	87	6.46

更高产量的 KCl，还需要引入部分氯离子。

脱硫废中富含氯离子，而烧结机头电除尘灰中氯离子含量低于 K、Na 元素的总含量，因此，把脱硫废液中氯离子资源化，作为一种有益补充，用于溶解烧结机头电除尘灰，并生产 KCl 具有一定的工业应用价值。

根据前述各物料分析结果，按照先去除钙、镁离子，再去除微量重金属离子的原则，设计协同处置试验方案如图 1 所示。由图 1 可知：将机头电除尘灰与脱硫废液以 1∶4的比例在溶解池内进行充分搅拌，随后将混合浊液送入压滤机过滤；将滤渣作为含铁原料送往综合原料场，而往滤液中加入工业纯碱继续搅拌，随后加入有机 S、$BaCl_2$ 等试剂，让重金属离子全部形成沉淀，将混合浊液再次倒入压滤机，得到较为纯净的滤液；随后再对滤液进行蒸发、浓缩结晶，得到 KCl，根据溶解度的不同对滤液进行二次浓缩分离得到 NaCl。

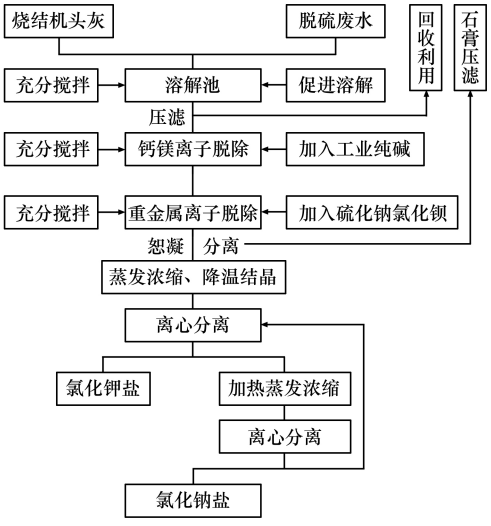


图 1　烧结机头电除尘灰与脱硫废液协同处置方案

Fig. 1　Co-processing plan for sintering process electrostatic precipitator ash and desulfurization waste liquid

2.1.1　滤液除杂方案

除尘灰溶于脱硫废液后，溶液中的离子主要为 K^{+}、Cl^{-}、Na^{+}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Fe^{3+} 和微量的 SO_4^{2-} 和 Pb^{2+} 等重金属离子。为了得到高纯度的氯化钾盐，须对溶液进行除杂，具体方法如下[10]。

（1）Ca、Mg 等金属离子的去除。滤液水中 Ca、Mg、Fe 等金属元素是 KCl 晶体盐中不允许存在的杂质，但这些元素的存在又有益于工业生产。因此，可以使用工业纯碱（Na_2CO_3），通过产生沉淀的方法，去除 Ca、Mg 等金属离子。工业纯碱的添加量为 2.0 ~ 8.0 g/L，搅拌速度设置为 300 ~ 500 r/min，搅拌时间设置为 10 min。化学反应方程式如下。

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} = CaCO_3 \downarrow \quad (1)$$

$$Mg^{2+} + CO_3^{2-} = MgCO_3 \downarrow \quad (2)$$

$$Fe_3^{+} + CO_3^{2-} = FeCO_3 \downarrow \quad (3)$$

（2）重金属离子的去除。重金属除杂剂选用 $Na_2S \cdot 9H_2O$，其添加量为 0.1 ~ 0.6 g/L；加入重金属除杂剂后进行搅拌，设置搅拌速度为 200 ~ 400 r/min，搅拌时间为 1 ~ 3 min[11]。由于重金属含量低，所以搅拌速度低、搅拌时间短。化学反应方程式如下。

$$Cu^{2+} + S^{2-} = CuS \downarrow \quad (4)$$

$$Pb^{2+} + S^{2-} = PbS \downarrow \quad (5)$$

$$Zn^{2+} + S^{2-} = ZnS \downarrow \quad (6)$$

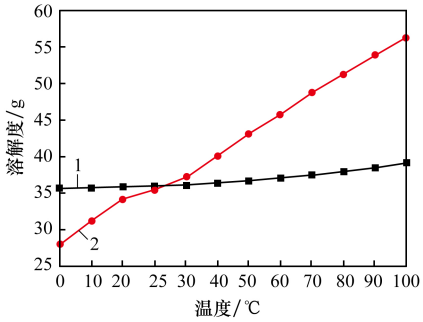
（3）SO_4^{2-} 离子的去除。SO_4^{2-} 除杂剂使用的是分析纯 $BaCl_2 \cdot 2H_2O$，其添加量为 10.0 ~ 40.0 g/L；加入 SO_4^{2-} 除杂剂后进行充分搅拌，设置搅拌速度为 500 r/min，搅拌时间为 15 min。由于 SO_4^{2-} 浓度高，且经过上述两步除杂后已产生了较多的沉淀，因此这一步的搅拌速度要继续增大、搅拌时间继续延长。

经过上述除杂操作后，溶液中的 Pb、Zn、Cu 等重金属、Ca 和 Mg 离子和硫酸根离子的总量都降到 0.001 g/L 以下，所得滤液可以视为仅含有 KCl 和 NaCl 的不饱和溶液。

2.1.2　滤液浓缩结晶过程及产品分析

KCl 和 NaCl 都易溶于水，但是 KCl 的溶解度

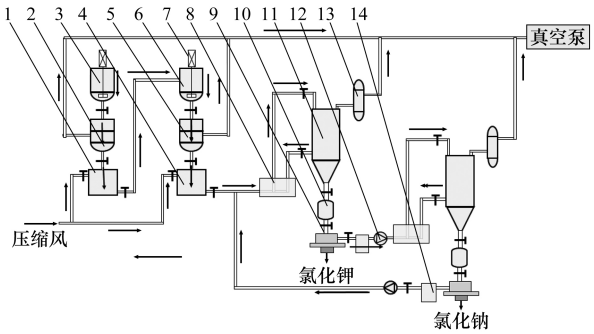
受温度的影响明显，而 NaCl 的溶解度受温度的影响较小，二者在 25 ℃时的溶解度基本一致，如图 2 所示。根据图 2 中 KCl 与 NaCl 溶解度随温度的变化关系设计二级浓缩结晶试验装置[12]，如图 3 所示。



1—NaCl；2—KCl。

图 2 KCl 与 NaCl 的溶解度随温度变化趋势对比

Fig. 2 Comparison of the solubility of potassium chloride and sodium chloride with the change of temperature



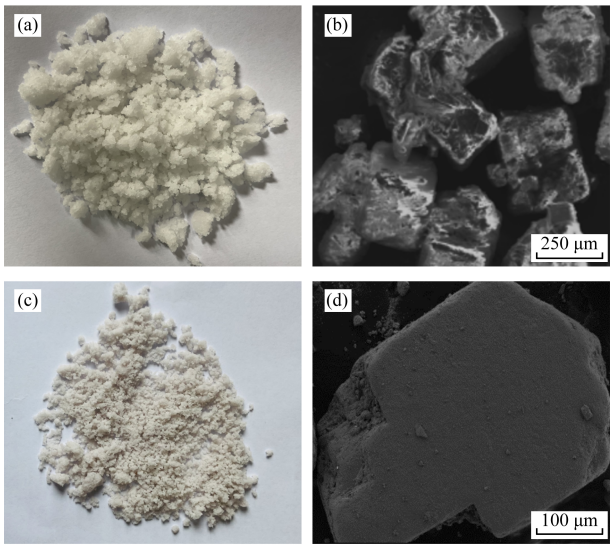
1—一级中转罐；2—一级抽滤装置；3—一级溶解池；4—二级中转罐；5—二级抽滤装置；6—二级除杂池；7—可调搅拌泵；8—溶液加热装置；9—离心机；10—中间分离罐；11—闪蒸罐；12—管道泵；13—冷凝器；14—离心溶液贮存罐。

图 3 氯化钾、氯化钠溶液浓缩结晶流程示意

Fig. 3 Schematic diagram of the concentrated crystallization process of potassium chloride and sodium chloride solution

二级浓缩结晶试验试验步骤：① 根据 KCl 与 NaCl 的溶解度与温度的关联特性，加入活性炭对滤液进行脱色处置[13]；② 采用负压闪蒸工艺将得到的滤液在 85 ℃条件下浓缩为氯化钾的饱和溶液，并降温至 28 ℃，滤液中析出晶体，过滤干燥即可得到 KCl 晶体，新得到的溶液为常温条件下 KCl 的饱和溶液；③ 将得到的溶液加热后，重新参与滤液的闪蒸、浓缩和过滤流程，再次获得 KCl 晶体；④ 经多次循环浓缩、过滤后得到常温下的滤液，在 KCl 处于饱和状态，而 NaCl 接近饱和状态时，加入活性炭进行脱色处置，将滤液转移到下一级闪蒸浓缩流程，并把滤液加热，在 85 ℃条件下进行二次闪蒸、浓缩。

高温下溶液中的 KCl 未处于饱和状态，而 NaCl 受温度的影响较小，随着水分的减少 NaCl 晶体开始大量析出。经洗涤、干燥后，制取的 KCl 和 NaCl 晶体如图 4 所示。对实验室样品进行分析，其 KCl 和 NaCl 的纯度分别达到 92.5% 和 95.7%，达到国家工业原料用盐的质量标准。



（a）KCl 实物；（b）KCl 扫描电镜图；（c）NaCl 实物；（d）NaCl 扫描电镜图

图 4 KCl 与 NaCl 产品实物和微观结构

Fig. 4 Physical and microscopic pictures of sodium chloride and potassium chloride

2.2 协同处置方案的经济性分析

（1）原料成本。处理烧结机头电除尘灰和脱硫废液都是环保工作中的痛点，将其转运至有资质的第三方环保处置单位，分别需要支付费用约为 100 元/t 和 50 元/t。在生产过程中，将烧结机头电除尘灰与脱硫废液按照 1∶4的比例进行投料、搅拌溶解。按照钢铁企业 4 个电场中机头灰 K_2O 平均质量分数为 28.795% 计算，每 5 t 机头灰同步消耗 20 m^3 的脱硫废水，产生 KCl 的量为2 143.54 kg，NaCl 的量为 445.65 kg，合计约为 2.59 t，即每生产 1 t 副产品，将减少环保处置费约为 579.6 元。

（2）辅料成本。每生产 1 t 副产品，对滤液水软化、除杂、除重金属所需辅料试剂费用约为 150 元/t。

（3）能源成本。系统能源消耗主要为电能和蒸汽，系统装机容量预计约为 130 kW·h，按照 1 元/(kW·h)计算，系统的电能消耗成本约为 200 元/t。按照每蒸发 1 t 水需要蒸汽 400 kg，蒸汽单价按 200 元/t 计算，预计需要蒸汽费用约为 640 元/t。

（4）管理成本及设备折旧预算约为 200 元/t。

综上所述，按照 1 t KCl 销售价为 2 000 元，1 t NaCl 销售价为 500 元，KCl 与 NaCl 的产量比例为 5∶1，回收铁精粉的经济效益忽略不计，则综合利润为 1 489.6 元/t(2 000 + 500/5 + 579.6 − 150 − 200 − 640 − 200 = 1 489.6 元)。

按照 400 万吨的产能规模计算，烧结机每月预计产生机头电除尘灰为 600 t，可生产 300 t KCl、60 t NaCl，每月将产生经济效益约为 44.7 万元。

3　结　论

（1）正常外排的脱硫废液相比工业用水，其氯离子的质量分数约为 1.5%，在氯离子资源化回收利用系统中，其质量占比非常小。烧结机头电除尘灰中碱金属元素的摩尔浓度为 Cl 元素的 1.18 倍。将两种工业废物以 4∶1的比例协同处置能够促进厂区循环经济的发展，实现高效资源化利用；同时，钢铁企业拥有大量的低品质热源，其在滤液浓缩结晶过程中耗费的蒸汽成本更低，因此协同处置烧结机头电除尘灰和脱硫废液具有实际意义。

（2）采用脱硫废液进行烧结机头电除尘灰的环保处置，不仅实现了氯离子的资源化利用，而且节省了大量工业用水；脱硫废液中的 Ca、Mg、Fe 等金属离子与硫酸根离子都以沉淀的形式进入铁精粉或脱硫石膏，此外，系统产生的各种重金属离子及有害元素，也进入脱硫石膏。本文提出的协同处置方案不仅净化了钢铁生产体系中的重金属杂质，而且在后续石膏的资源化利用过程中，能够把重金属离子等有害元素固化在建筑材料内，降低对环境保护工作的影响。

（3）应用本文提出的协同处置方案，每生产 1 t KCl 可产生综合效益 1 489.6 元。按照 400 万吨的规模测算，烧结机每月产生机头灰 600 t，应用新技术每月可生产 300 t 的 KCl、60 t 的 NaCl，每月经济效益约为 44.7 万元。

参考文献：

[1] 张静，薛彦辉，李伟杰，等. 烧结机头灰化学浸出试验研究[J]. 烧结球团，2020，45(1)：77－81.
ZHANG Jing，XUE Yanhui，LI Weijie，et al. Experimental study on chemical leaching of dust at sintering machine feed end[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(1)：77－81.

[2] 李强，亓玉辉，查丽萍，等. 解决烧结机算条糊堵问题的实践[J]. 烧结球团，2008，33(3)：50－54.
LI Qiang，QI Yuhui，CHA Liping，et al. About the prevention sticking of material on sintering machine grate[J]. Sintering and Pelletizing，2008，33(3)：50－54.

[3] 黄东生，王荣恩，汤楚贵. 烧结烟气脱硫技术探讨[J]. 烧结球团，2008，33(3)：6－10.
HUANG Dongsheng，WANG Rongen，TANG Chugui. Discussion on sintering flue gas desulfurization technology[J]. Sintering and Pelletizing，2008，33(3)：6－10.

[4] 黄慧君，黄金虹. 浅析工业废水中氯离子去除研究发展现状[J]. 资源节约与环保，2019(7)：94.
HUANG Huijun，HUANG Jinhong. Analysis of the status quo of the research and development of chloride ion removal in industrial wastewater[J]. Resource economization & environmental protection，2019(7)：94.

[5] 张湘鹤，吕先贺，叶鹏，等. 烧结机头烟灰资源化利用的研究进展[J]. 武汉工程大学学报，2019，41(1)：35－39；45.
ZHANG Xianghe，LÜ Xianhe，YE Peng，et al. Progress in resources utilization of sintering dust[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology，2019，41(1)：35－39；45.

[6] 卢伟佳，苗广志，苏东学，等. 除尘灰中微量有害元素的富集形态研究[J]. 冶金能源，2012(2)：55－58.
LU Weijia，MIAO Guangzhi，SU Dongxue，et al. Research of micro harmful element enrichment in the iron-making dust[J]. Energy for Metallurgical Industry，2012(2)：

55 – 58.

[7] 孙普. 烧结脱硫废水处理工艺的改进及优化[J]. 南方金属,2016,209(2):45 – 48.
SUN Pu. Optimization of treatment process for FGD waste water of sintering at SGIS[J]. Southern Metal, 2016, 209(2):45 – 48.

[8] 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 sintering EAF dust[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2014, 14(6): 979 – 983.

[9] 乔波波,康安. 氢氧化钙脱硫剂在烧结烟气湿法脱硫中的应用[C]//钢铁流程绿色制造与创新技术交流会论文集. 天水:钢铁研究总院,2018.
QIAO Bobo, KANG An. Application for desulfurizer of calcium hydroxide in wet desulphurization for sintering flue gas[C]//Proceedings of Green Manufacturing and Innovative Technology Exchange Conference on Steel Process. Tianshui: Central Iron and Steel Research Institute,2018.

[10] 李志峰,林七女,董晓春,等. 烧结机头除尘灰生产氯化钾的应用研究[J]. 中国资源综合利用,2010,28(2):13 – 15.
LI Zhifeng, LIN Qinv, DONG Xiaochun, et al. Research and application of KCl production in sintering head removed dust[J]. China Resources Comprehensive Utilization,2010,28(2):13 – 15.

[11] 蒋雨露,魏愈宋,刘真,等. 含重金属烧结机机头灰的综合利用研究[J]. 烧结球团,2020,45(3):59 – 64.
JIANG Yulu, WEI Yusong, LIU Zhen, et al. Research on comprehensive utilization of sinter ash containing heavy metals of sintering machine[J]. Sintering and Pelletizing, 2020,45(3):59 – 64.

[12] 于蒙. 高盐废水浓缩结晶回用工艺技术[J]. 山东化工,2019,48(13):242;246.
YU Meng. Technology of concentration and crystallization recycling of high-salt wastewater[J]. Shandong Chemical Industry,2019,48(13):242,246.

[13] 张益魁,王建业. 光卤石矿中氯化钾和氯化钠分离工艺的试验研究[J]. 海湖盐与化工,1994(5):1 – 5.
ZHANG Yikui, WANG Jianye. Experimental study on the separation process of potassium chloride and sodium chloride in carnallite ore[J]. Sea-Lake Salt and Chemical Industry,1994(5):1 – 5.

(上接第64页)

LI J, MAO X M, ZHU D Q. Analysis of factors affecting the reduction performance of sintering ore from Bayi steel [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(2): 20 – 24.

[18] YANG L X, MATTHEWS E. Sintering reactions of magnetite concentrates under various atmospheres[J]. ISIJ International, 1997, 37(11): 1057 – 1065.

[19] WANG J K, MA P N, MENG H X, et al. Investigation on the evolution characteristics of bed porous structure during iron ore sintering[J]. Particuology, 2022, 74: 35 – 37.

[20] JI M T, LUO J W, ZHOU H. Experimental study on melt and flow characteristics and pore structure of iron ore [J]. Chemical Engineering Science, 2022, 264: 118185.

(上接第92页)

[15] 甘德清,韩亮,刘志义,等. 尾砂粒级组成对充填体强度特性影响的试验研究[J]. 化工矿物与加工,2017,46(4):57 – 61.
GAN Deqing, HAN Liang, LIU Zhiyi, et al. Experimental study on influence of tailing size composition on strength characteristics of backfill[J]. Chemical minerals and processing, 2017, 46(4): 57 – 61.

[16] 彭浩. 基于骨料级配优化的混凝土配合比设计方法研究[D]. 北京:北京建筑大学,2014.
PENG Hao. Research on concrete Proportion design method based on aggregate Gradation optimization[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2014.

[17] 陈忠达,袁万杰,郑启东. 级配理论应用研究[J]. 重庆交通学院学报. 2007,29(9):111 – 114.
CHEN Zhongda, YUAN Wanjie, ZHENG Qidong. Application of gradation theory[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2007, 29(9): 111 – 114.