

引用格式: 岳龙, 张江拓, 陈儒稼. 铜冶炼制酸系统中低温位余热回收装置的应用实践[J]. 有色设备, 2025, 39(3): 84-90.  
YUE Long, ZHANG Jiangtuo, CHEN Rujia. Application of low-temperature waste heat recovery technology in copper smelting sulfuric acid systems[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(3): 84-90.

# 铜冶炼制酸系统中低温位余热回收装置的应用实践

岳 龙, 张江拓, 陈儒稼

(国投金城冶金有限责任公司, 河南 灵宝 472500)

[摘 要] 铜冶炼制酸系统余热利用率低, 低温位余热未有效回收, 导致能源浪费与环境热污染。低温位余热回收工艺, 可优化铜冶炼制酸系统的能源利用效率。其原理基于热交换原理的余热回收装置, 通过蒸汽发生器、高温吸收塔等核心设备实现余热梯级利用, 并采用脱盐水替代生产水提升硫酸品质。某公司装置投用后, 蒸汽产量达 40 t/h, 年经济效益约 2 600 万元, 循环水电耗降低 560 kWh/h, 酸中杂质含量显著减少。该装置可实现低温位余热高效回收, 兼具经济与环境效益, 为铜冶炼行业节能减排提供技术参考。

[关键词] 铜冶炼; 制酸工艺; 低温位余热回收; 节能优化; 汽轮发电; 设备腐蚀控制

[中图分类号] TF813 [文献标志码] A [文章编号] 1003-8884(2025)03-0084-07

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.03.009

## 0 前言

当前, 国家对绿色节能环保减排要求不断提高, 越来越重视节能减排和可持续发展, 同时在碳达峰和碳排放逐步市场化的背景下, 铜冶炼行业面临产能饱和和竞争激烈化、成本管理白热化的挑战, 技术创新和降本增效成为企业首选。低温位余热回收技术作为一种资源循环利用方式, 合理利用生产过程中产生的蒸汽资源, 在减少碳排放, 降低企业能源成本, 收益等环境、经济方面有着显著效益。

在铜冶炼过程中, 制酸系统会产生大量的余热, 其中低温位余热若未得到有效回收利用, 不仅会造成能源的浪费, 还会对周边环境产生一定的热污染。低温位余热回收技术的研发与应用, 为解决这一问题提供了可行的技术方案。该技术通过合理的工艺设计和设备配置, 实现了资源的循环利用。这不仅有助于降低企业的能源成本, 减少对外部能源的依赖, 还能显著削减碳排放。

在某公司制酸系统中, 低温位余热回收装置投入使用后, 高温吸收塔内浓硫酸喷淋吸收  $\text{SO}_3$  气体产生的热量, 在蒸汽发生器内与水换热, 产出 0.8 MPa 左右的蒸汽, 这些蒸汽可用于对外销售或

驱动汽轮机发电, 从而为企业创造了经济效益。同时, 生产过程中采用脱盐水代替原有生产水调节硫酸浓度, 有效降低了成品硫酸中 Mg、Ca、Fe、Mn 等元素的含量, 进而提高了成品硫酸的品质。

本文将详细介绍铜冶炼制酸系统中低温位余热回收装置的工艺原理、工艺流程、主要设备及其作用, 并对装置投入前后的运行效果进行对比分析, 阐述投入使用后的优化改进措施以及带来的经济效益, 旨在为铜冶炼行业的节能减排和可持续发展提供有益的参考和借鉴。

## 1 低温位余热回收装置工艺原理

### 1.1 工艺原理

在铜冶炼制酸系统中, 低温位余热回收装置主要基于热交换原理, 利用制酸过程中产生的低温余热来加热工质, 实现能量的回收与再利用。低温位余热回收装置主要由高温吸收塔、蒸汽发生器、喷射水泵、蒸发除氧器、蒸发器给水加热器、蒸发器给水泵、脱盐水箱、脱盐水加热器、高温循环泵槽、高温浓硫酸循环泵、混合器、储气罐组成, 其工艺流程如图 1 所示。

在该装置中, 从制酸系统吸收塔出来的高温浓

[收稿日期] 2025-01-26

[第一作者] 岳龙(1992—), 男, 甘肃榆中人, 化工工程师, 主要从事冶炼烟气除尘、制酸、脱硫脱硝等工作。

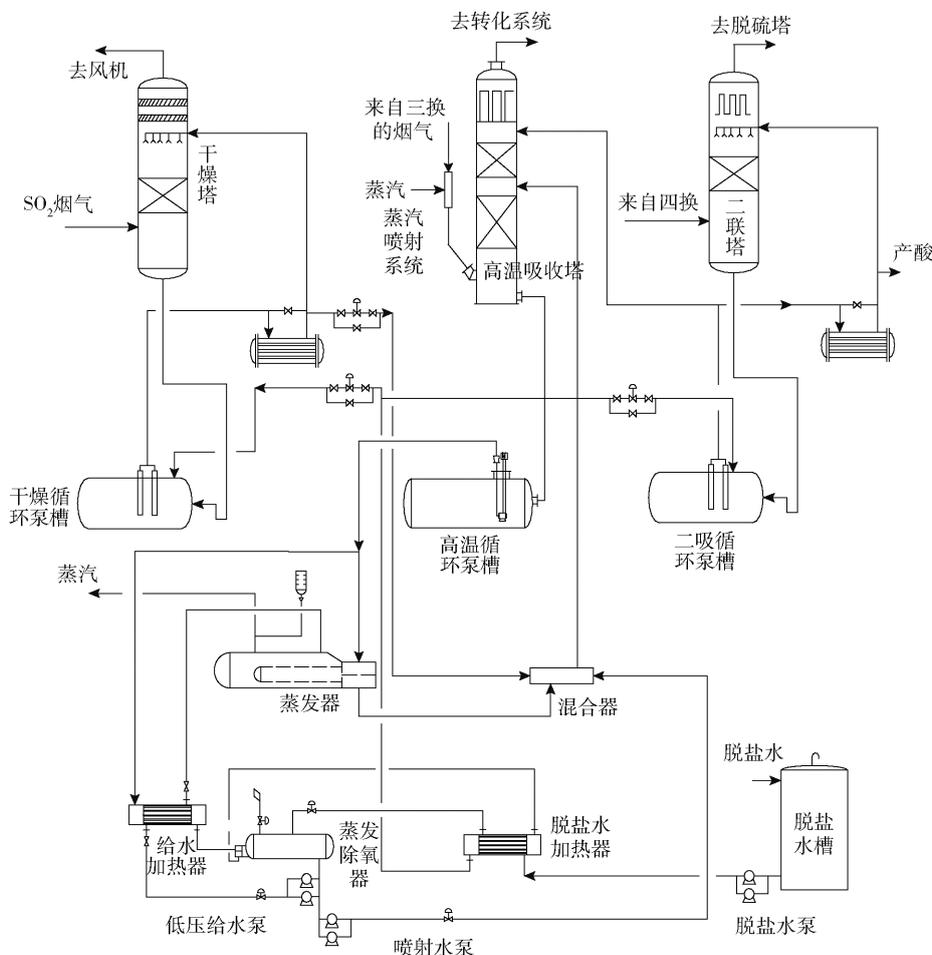


图1 低温位余热回收流程

Fig.1 Process flow of low-grade waste heat recovery

硫酸(温度  $200 \sim 220 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 浓度  $99\% \sim 99.5\%$ ) 首先进入蒸汽发生器。蒸汽发生器是关键设备之一,其管程走酸,壳程走水。高温浓硫酸的热量传递给壳程中的水,使水汽化为低压蒸汽(一般压力在  $0.8 \sim 1.2 \text{ MPa}$ )。浓硫酸经过蒸汽发生器后,温度降至  $180 \sim 190 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 然后分为两路<sup>[1]</sup>。

1) 第一路: 进入混合器, 在混合器中与来自喷射水泵的水混合, 调节浓度后返回吸收塔第一段填料, 继续参与吸收过程。这一过程中, 通过精确控制混合器的加水量, 确保进入吸收塔第一段的酸浓度维持在  $99\%$  左右, 以保证吸收效果。

2) 第二路: 进入蒸发器给水加热器, 将从除氧器来的蒸发器给水从  $120 \sim 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$  预热至  $160 \sim 165 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 然后进入蒸发除氧器。在蒸发除氧器中, 利用浓硫酸的余热将水加热除氧, 并部分蒸发产生低压乏汽(压力  $0.1 \sim 0.2 \text{ MPa}$ ), 这些乏汽可用于其他

工艺环节, 如送入蒸汽喷射系统提升工艺气体温度。经过蒸发除氧器后的浓硫酸温度进一步降低至  $100 \sim 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 随后流入脱盐水加热器, 将流入蒸发除氧器的脱盐水从  $40 \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  预热至  $120 \sim 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最后浓酸温度降至  $90 \sim 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 送至干燥循环槽和二吸循环槽。

同时, 脱盐水通过脱盐水泵加压进入脱盐水加热器, 被加热后送入蒸发除氧器。在蒸发除氧器中, 一部分脱盐水蒸发产生低压乏汽, 另一部分被热力除氧生成除氧水。一部分除氧水通过低压给水泵送入蒸发器给水加热器, 再进入蒸汽发生器产生低压蒸汽, 并入现有蒸汽管网; 另一部分除氧水通过喷射水泵送入混合器, 用于调节进入高温吸收塔第一段硫酸的浓度。

工艺气体则从转化工序的特定位置引出, 先进入蒸汽喷射系统, 与蒸发除氧器产生的低压乏汽接

触,温度升高后进入高温吸收塔。在高温吸收塔内,工艺气体经过2层填料,分别与不同温度、不同浓度的硫酸逆流接触,完成传质传热过程,大部分三氧化硫被吸收,剩余烟气通过高温吸收塔顶部除雾装置除去酸雾后再次送入转化系统,进行二次转化。

## 1.2 工艺流程

### 1.2.1 烟气系统流程

一次转化气体经中压热管锅炉冷却后进入低温位余热回收装置蒸汽喷射系统。在蒸汽喷射系统中,与喷入的低压乏汽(0.1 MPa)反应,工艺气体温度升高至200℃左右,升温后的工艺气体从高温吸收塔塔底侧面进入,在高温吸收塔内,工艺气体要经过两层填料,不同温度、不同浓度的硫酸逆流接触,有效吸收绝大部分的三氧化硫。其中,第一段采用高温99%浓度的硫酸吸收,第二段采用98.5%低温硫酸吸收<sup>[2]</sup>。通过这种两段式吸收方式,不仅能确保对三氧化硫的高效吸收,还能通过低温酸除去部分酸雾。然后再通过塔顶除雾器去除剩余烟气中的绝大部分酸雾,最后再送入转化系统,继续参与后续的生产过程,实现了资源的循环利用和生产过程的连续性。

### 1.2.2 酸系统工艺流程

高温吸收塔采用独特的两段式吸收工艺。第一段采用高温99%浓度的硫酸吸收,第二段采用98.5%低温硫酸吸收<sup>[2]</sup>。在吸收三氧化硫气体后,高温高浓度硫酸会进入塔底的高温循环槽。高温循环槽作为酸系统的重要储存和中转设备,起到了稳定酸量和酸浓度的作用。从高温循环槽出来的硫酸,由高温循环泵加压送入蒸汽发生器。高温循环泵的作用是为硫酸提供足够的压力,使其能够顺利进入蒸汽发生器,并在其中进行换热。

在蒸汽发生器内,高温浓硫酸与蒸汽发生器内的除氧水进行换热,这一换热过程是产生蒸汽的关键步骤<sup>[3]</sup>。在换热过程中,高温浓硫酸将自身的热量传递给除氧水,使除氧水汽化产生蒸汽。而出自蒸汽发生器的高温浓硫酸,由于热量被传递出去,温度降低。之后,这部分硫酸分为两路。①第一路进入混合器,在混合器中用喷射水调节浓度后,进入高温吸收塔第一段填料,循环吸收烟气中的三氧化硫。混合器的作用是实现硫酸与喷射水的均匀混合,确保进入高温吸收塔的硫酸浓度符合工艺要求。②第二路则送入除氧水加热器,将进入蒸发器的给水预

热至165℃左右,再送入蒸发器除氧器。在蒸发器除氧器中,硫酸将脱盐水加热除氧,并部分蒸发产生0.1 MPa左右的低压乏汽。产生的低压乏汽进入脱盐水加热器,预热进入蒸发除氧器的脱盐水,之后浓酸温度降低至90℃左右,被送至干燥循环槽和二吸循环槽,实现了酸的循环利用和热量的梯级利用。

此外,高温吸收塔的第二段98.5%低温硫酸来自二吸阳极保护酸冷却器出口,其温度控制在60℃左右。这部分低温硫酸被送入高温吸收塔第二段,用于吸收高温吸收塔第一段出口的工艺气体中的三氧化硫和酸雾。第二段吸收后的下塔酸与第一段下塔酸在塔底汇合,共同进入后续的处理流程。干吸工序干燥泵出口接出串酸,一部分至低温余热回收系统混合器,另一部分经脱吸塔脱除二氧化硫后送至二吸循环槽,起到平衡二吸循环槽液位及酸浓度的作用,确保了整个酸系统的稳定运行。

### 1.2.3 汽水系统流程

利用高温循环硫酸的热量产生0.8 MPa左右的低压蒸汽,并利用高温吸收循环系统外送硫酸加热蒸发器给水和低压冷凝水。

厂区内产出的冷凝水(或脱盐水)先送入脱盐水加热器,用低温热系统外送浓硫酸的热量加热至120℃左右,再送入蒸发除氧器,其中一部分蒸发产生0.1 MPa左右的低压乏汽,送入蒸汽喷射系统,剩余部分冷凝水(或脱盐水)经加热后热力除氧生成除氧水,一部分除氧水经低压给水泵加压后,送入蒸发器给水加热器,在该设备中加热至165℃左右送到蒸发器,低压给水在蒸发器中蒸发产生0.8 MPa的低压饱和蒸汽;另一部分除氧水经喷射水泵加压送至混合器,调节进入高温吸收塔第一段硫酸的浓度,循环吸收工艺气体中的SO<sub>3</sub>。

蒸发器定期排污、连续排污及紧急放水汇集至排污总管后进入定期排污膨胀器,闪蒸后蒸汽放空,污水排入排污池。

## 2 低温位余热回收装置主要设备

### 2.1 高温吸收塔

高温吸收塔是低温位余热回收装置的主要设备,来自硫酸工段一次转化后的气体在该塔内用高温浓硫酸进行吸收,并产生大量的低温位热能。高温吸收塔除雾器花板及以上部分采用316L不锈钢材料制造,高温吸收塔除雾器花板以下部分全部采

用耐高温浓硫酸的合金材料制造。

高温吸收塔分为2段。①下部第一段为高温吸收段,采用高温浓硫酸吸收烟气中的 $\text{SO}_3$ ,并产生大量热量;②上部第二段为低温吸收段,用于冷却烟气,进一步除去烟气中剩余的三氧化硫以及减少酸雾。

## 2.2 蒸汽发生器

蒸汽发生器是低温位余热回收装置的核心设备之一,其结构设计和材料选择至关重要。高温浓硫酸由高温循环泵送入蒸汽发生器的管程,与壳程的蒸发器给水换热后,温度由 $205\text{ }^\circ\text{C}$ 左右降至 $185\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,同时将蒸发器给水汽化为 $0.8\text{ MPa}$ 的饱和蒸汽。在实际运行中,蒸汽发生器的蒸汽产量和换热效率受到多种因素影响,如酸温度和酸流量的稳定性、给水水质等。当酸温度波动较大时,蒸汽产量会随之波动,影响整个余热回收系统的稳定性;而给水水质中的杂质和硬度较高时,会导致换热管结垢,降低换热效率,增加能耗。

## 2.3 蒸发除氧器

低温位余热回收装置的蒸发除氧器是1台低压釜式蒸发器。管程走酸,壳程走水。高温浓硫酸进入管程,与壳程的脱盐水换热,热力除氧并产生 $0.1\text{ MPa(g)}$ 的饱和蒸汽。

## 2.4 蒸发器给水加热器

蒸发器给水加热器是1台卧式管壳式换热器,管程走酸,壳程走水。其作用是将 $99.5\%$ 硫酸从 $185\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $165\text{ }^\circ\text{C}$ ,同时将蒸发器给水从 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 加热到 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 。在日常操作中,需要密切关注酸进出口的温度变化,防止出现逆温差现象。一旦出现逆温差,表明换热器内可能有泄漏,水进入酸侧,导致酸浓度降低,不仅影响余热回收效果,还会对设备造成腐蚀。此时,应立即停车检查,找出泄漏点并进行修复。此外,还需定期对蒸发器给水加热器进行清洗,去除换热管表面的污垢,提高换热效率。

## 2.5 脱盐水加热器

脱盐水加热器同样是卧式管壳式换热器,管程走酸,壳程走水,用于将 $99.5\%$ 硫酸从 $165\text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $140\text{ }^\circ\text{C}$ ,同时将低压冷凝水从 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 加热到 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 。该加热器设有酸副线,以便将低压冷凝水的出口温度控制在合适范围内。在运行过程中,要注意检查酸副线阀门的开度,根据低压冷凝水的温度需求进行调节。同时,与蒸发器给水加热器相同,要关注酸进出口温度,防止出现泄漏导致酸浓度降低和设备腐

蚀。定期对脱盐水加热器进行维护,包括检查换热管的腐蚀情况、清理壳程和管程的污垢等,确保其正常运行。

## 2.6 高温循环泵槽

高温循环泵槽用于储存热吸收塔循环的高温浓硫酸,与热吸收塔通过法兰连接,槽体全密封设计。

## 2.7 高温浓硫酸循环泵

高温循环泵负责将高温浓硫酸从高温循环泵槽通过蒸汽发生器、混合器送入高温吸收塔第一段喷淋设备进行循环,并将多余的浓硫酸输送到干吸酸循环槽<sup>[4]</sup>。某公司使用的高温循环泵为立式液下泵,流量 $1\ 350\text{ m}^3/\text{h}$ ,压头 $19\text{ m}$ 。泵的过流部件由特殊不锈钢材料制造,如316L不锈钢、双相不锈钢等,以适应高温浓硫酸的工作环境。采用填料轴封和干气密封相结合的方式,有效防止浓硫酸泄漏;轴承箱采用循环水冷却,确保泵在运行过程中的温度稳定。在长期运行过程中,高温循环泵的密封性能和轴承寿命是需要重点关注的问题。密封失效会导致浓硫酸泄漏,不仅造成物料损失,还会对环境和人员安全造成威胁;而轴承磨损则会影响泵的正常运行,增加维修成本和停机时间。因此,需要定期对高温循环泵进行维护和保养,如检查密封件的磨损情况、更换润滑油、监测轴承的运行状态等。

## 2.8 混合器

混合器是一台耐酸钢内衬特殊四氟的设备,通过压缩空气将脱盐水喷入混合器内,使酸与水充分混合。混合器的加水管线上设有管道过滤器,防止杂质堵塞喷水孔;同时设有切断阀、排液阀和止回阀,且止回阀后管道为衬四氟管道,有效防止酸倒流腐蚀水管线。在混合器的运行过程中,加水量的控制和混合效果是关键。加水量不准确会导致进入吸收塔的酸浓度不稳定,影响吸收效率;而混合不充分则会造成局部酸浓度过高或过低,加速设备腐蚀。因此,需要精确控制加水量,并确保混合器的搅拌装置正常运行,以实现酸和水的均匀混合。

## 3 低温位余热回收装置应用及改进措施

### 3.1 应用实践

以某公司为例,年产酸 $60\text{ 万 t}$ 左右,在低温位余热回收装置投入使用前,制酸干吸工段采用干燥塔干燥烟气、一吸塔一次吸收、二吸塔二次吸收的方式,用阳极保护酸冷却器对酸进行换热,需使用大量

循环水将热量带走,造成热量的损失,且由于水质差及酸中存在杂质,导致阳极保护酸冷器酸路及水路结垢堵塞;水路堵塞时各塔循环酸温持续升高,酸路堵塞时压力上涨最终引起循环水功耗增加,循环酸温上涨超过 125 ℃,总体造成系统换热效果差,影响各项指标,降低系统生产负荷,限制企业产能扩展;同时循环水工段开启 3 台 560 kW 的水泵对工艺进行降温。

在低温位余热回收装置投入使用后,将一吸塔用高温吸收塔代替,将吸收过程中浓硫酸的热量用于产蒸汽,从而回收利用被一吸阳极保护酸冷器带走的热量,每小时可产生 0.8 MPa 的蒸汽 40 t 左右,可产生经济效益约 6 000 元/h;同时停运 1 台循环水泵并降低凉水塔风扇负荷,每小时可节约电耗 560 kWh。

表 1 改造前后运行参数对比

Table 1 Technical specifications of main equipment

指标	改造前	改造后
蒸汽产量/(t·h <sup>-1</sup> )	0	40
循环水电耗/(kWh·h <sup>-1</sup> )	1 680	1 120
酸中 Cl <sup>-</sup> 含量/ppm	15.2	2.8
系统热效率/%	68.5	82.3

### 3.2 优化改进措施

以某公司低温位余热回收系统投入运行后,由于脱盐水泵的连续运行,但后续除氧器等设备用水

需更具液位控制,间断供水,导致短时间管道内压力剧增,设备损坏,影响系统运行。且干吸系统硫酸为相互调节,导致干燥塔或二吸塔加水后的酸部分进入高温吸收塔,导致水中杂质离子在高温情况下加剧对设备的影响,根据以上情况该公司结合现场实际运行情况,对系统做出以下改造。

#### 3.2.1 在脱盐换热器出口增加回流至脱盐水储槽

低温位余热回收系统中,脱盐水通过脱盐水泵送入脱盐水换热器与酸换热后进入除氧器,但除氧器液位的高低联锁控制脱盐水至除氧器阀门的开关,若除氧器液位高可导致阀门联锁关闭,若阀门长时间关闭可导致脱盐水换热器内部脱盐水不流动与酸持续换热,若热量持续被脱盐水换热器内部水吸收,导致水汽化膨胀,从而导致脱盐水换热器超压损坏。为解决该问题,可在联锁阀门前端支流管道至脱盐水储槽,使去除氧器阀门关闭的情况下,联锁将新增阀门联锁打开,保证脱盐水换热器内部水流,防止汽化膨胀,避免换热器损坏造成损失<sup>[5-7]</sup>。

#### 3.2.2 使用脱盐水代替生产水,提高成品硫酸品质

原系统加水为添加一次水,导致水中杂质进入浓硫酸中,但塔槽内有防腐砖,高温酸无法对塔槽造成腐蚀。但低温位余热回收系统高温吸收塔、槽无内衬,且部分酸管道仍然为高温酸,此时水中的氟、氯等杂质容易直接接触不锈钢材质造成腐蚀,缩短设备运行寿命。为解决该问题,将一次水改为脱盐水,可减少杂质带入,避免塔内规整填料堵塞,同时

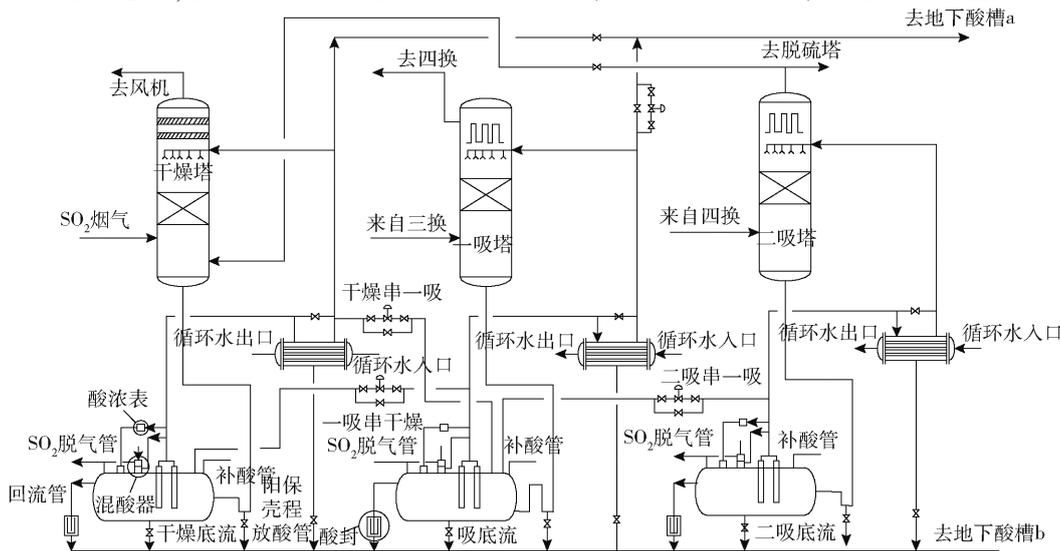


图 2 原工艺流程

Fig. 2 Original process flow diagram

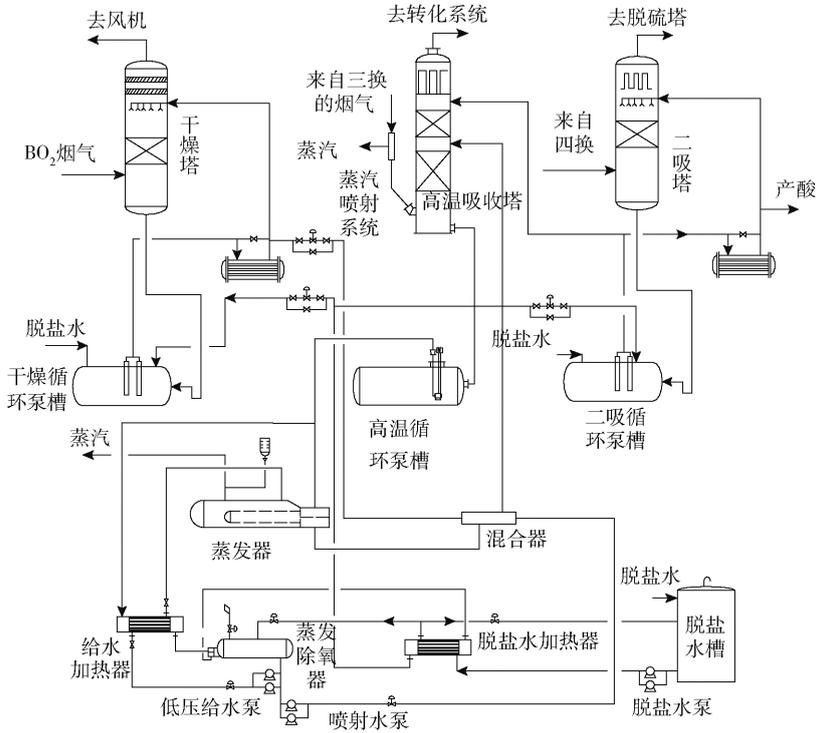


图3 低温位余热回收系统优化后的流程图

Fig. 3 Optimized process flow diagram of low-grade waste heat recovery system

减缓设备腐蚀,同时提高了成品酸品质(酸中钙、镁离子等明显减少)。

#### 4 应用过程中的问题与解决方案

在低温位余热回收装置的应用过程中,会遇到了一系列问题。

##### 4.1 换热器腐蚀

换热器的腐蚀问题较为突出。由于制酸系统中的烟气含有大量的酸性气体和杂质,在与换热器接触过程中,容易对换热器的材质造成腐蚀,影响其使用寿命和换热效果。针对这一问题,该厂采取了多种措施:选用了耐腐蚀性能更好的材料制造换热器,如不锈钢、钛合金等;加强了对烟气的预处理,去除其中的杂质和酸性气体。通过这些措施的实施,有效地缓解了换热器的腐蚀问题,延长了其使用寿命。

##### 4.2 结垢

在低温位余热回收系统的运行维护中,系统的结垢问题也是常见的技术障碍之一。在余热回收过程中,循环水或其他介质中的杂质和盐分容易在换热器表面结垢,降低换热效率。为了解决这一问题,该厂加强了对循环水的水质管理,定期对循环水进

行检测和处理,确保其符合使用要求。采用了在线清洗技术,定期对换热器进行清洗,去除表面的污垢。还设置了过滤器,对循环水进行过滤,防止杂质进入换热器。通过这些措施的综合应用,有效地解决了系统的结垢问题,保证了余热回收装置的稳定运行。

##### 4.3 设备故障和维护管理

在装置的运行过程中,还出现了设备故障和维护管理方面的问题。由于装置的运行环境较为复杂,设备容易出现故障,影响装置的正常运行。为了解决这一问题,该厂定期对设备进行检查、维护和保养,及时发现和解决设备故障。加强了对操作人员的培训,提高其操作技能和故障处理能力。还制订了应急预案,在设备出现故障时能够迅速采取措施,减少损失。通过这些措施的实施,有效地提高了设备的可靠性和稳定性,保证了装置的正常运行。

#### 5 低温位余热回收装置的应用实例

某公司在其制酸系统中引入了低温位余热回收装置,旨在提升能源利用效率,减少对环境的污染,同时降低生产成本。该装置的应用是基于对该厂制酸工艺的深入分析和对余热资源的精准评估,

力求实现余热的最大化回收和有效利用。

在工艺流程方面,该装置紧密结合制酸工艺的特点。来自冶炼炉的高温烟气首先进入余热锅炉,回收部分显热后,降低烟气温度至适宜范围,随后进入低温位余热回收装置。在装置内,烟气依次通过多个换热器,与循环水或其他介质进行热交换,将烟气中的余热传递给介质,使其升温。升温后的介质进一步用于生产蒸汽、预热锅炉给水或满足其他生产环节的用热需求。通过这样的流程设计,实现了烟气余热的逐级回收和高效利用<sup>[8-10]</sup>。

在设备选型上,该厂选用了高效的耐腐蚀换热器,具有提高传热效率、减小占地面积等优点,能够适应制酸系统中复杂的工况条件。同时,配备了先进的循环泵和控制系统,确保循环水或其他介质能够稳定、高效地循环流动,实现热量的持续传递和回收。循环泵采用了节能型产品,能够在满足流量和扬程要求的前提下,降低能耗。控制系统则实现了对装置运行参数的实时监测和自动调节,确保装置始终处于最佳运行状态。

在经济效益方面,该装置 2024 年 8 月投入运行至 2024 年 10 月共计运行 58 d,累计消耗脱盐水 42 535 m<sup>3</sup> (折合人民币 38.281 5 万元),消耗电量 390 456 kWh (折合人民币 28.112 8 万元)。产生蒸汽 37 936 t (折合人民币 569.04 万元)。期间产生经济效益为 502.645 7 万元,日均 8.666 3 万元。每年按 300 d 运行周期计算,可产生经济效益大约为 2 600 万元。这充分表明低温位余热回收装置在回收余热、降低能源消耗方面具有巨大潜力。

## 6 结语

此低温位余热回收装置可有效解决目前铜冶炼行业在制酸干吸工段阳极保护换热效果差制约企业产能的问题,同时利用系统生产过程中产生的热能,在铜冶炼制酸工艺方面有较好的推广意义,该装置的使用可有效提高企业生产效益。

1) 问题与研究方法。针对铜冶炼制酸系统中低温位余热利用率低、能源浪费严重及设备腐蚀等问题,本研究提出了一种基于热交换原理的低温位余热回收技术。通过构建三级梯级换热系统,集成高温吸收塔、蒸汽发生器等核心设备,并采用脱盐水替代生产水,实现了余热的高效回收与硫酸品质的同步提升。技术路线涵盖烟气处理、酸循环优化及

智能控制模块,解决了传统工艺中换热效率低、水质依赖性强等瓶颈。

2) 技术验证与优化成果。运行数据表明,该装置蒸汽产量达 40 t/h,系统热效率由 68.5% 提升至 82.3%,酸中 Cl<sup>-</sup> 含量降低 81.6% (从 15.2 ppm 降至 2.8 ppm)。关键参数如蒸汽压力波动 ( $\pm 0.05$  MPa) 和酸浓度控制精度 ( $\pm 0.3%$ ) 通过连续运行验证,符合 ASME PTC 4.1 热平衡测试标准。采用 316L 不锈钢和双相合金材料,设备腐蚀速率降至 0.08 mm/a,寿命延长 40%,技术可靠性得到充分验证。

3) 工业应用与推广价值。在年产 60 万 t 酸的某铜冶炼项目中,该装置投用后实现年经济效益 2 600 万元,投资回收期仅 2 年,并减少 CO<sub>2</sub> 排放 9.05 万 t/a。通过增设脱盐水回流系统、优化水质管理等措施,解决了管道超压及设备腐蚀问题。实际应用表明,系统可适应不同生产负荷 ( $\pm 15%$  波动),其模块化设计与智能控制技术为铜冶炼行业提供了可复制的节能减排解决方案,具有推广价值。

本研究通过技术集成与工程实践,不仅提升了余热回收效率,还为行业绿色转型提供了兼具经济效益和环境效益的创新路径。

### [参考文献]

- [1] 俞向东. 国产低温热回收技术在大型硫磺制酸装置中的应用[J]. 硫酸工业,2012(1):37-38.
- [2] 孙正东. 硫铁矿和冶炼烟气制酸配套低温余热回收系统技术总结[J]. 硫酸工业,2017(3):20-26.
- [3] 汤鹏. 硫酸低温余热回收蒸汽发生器的优化设计[D]. 淮安:淮阴工学院,2020.
- [4] 李丽. 硫磺制酸低温余热回收的设计与实施[D]. 武汉:武汉工程大学,2014.
- [5] 朱启保,李忠. 热管锅炉在某铜冶炼厂烟气制酸系统余热回收中的应用[J]. 有色冶金节能,2019,35(3):24-28.
- [6] 解增光. ISP 密闭鼓风机冶炼过程中的余热综合利用[J]. 有色矿冶,2018,34(5):30-35.
- [7] 李桂珍. 利用制酸尾气余热浓缩稀硫酸的研究[J]. 硫酸工业,2024(3):54-56,64.
- [8] 张兆雄,何恩,胡玉龙,等. 铜冶炼 PS 转炉烟气治理研究及应用[J]. 云南冶金,2024,53(2):171-175.
- [9] 赵宣泊,刘岩,徐洪波. 红土镍矿微波碳热还原——超声氨浸工艺研究[J]. 有色矿冶,2023,39(1):24-31.
- [10] 胡玉龙,王旭,张兆雄,等. 铜冶炼转炉渣缓冷过程生产实践[J]. 云南冶金,2023,52(5):91-95.

(下转第 105 页)

## Application and practice of hydrogen sulfide synthesis process in wastewater treatment of copper smelting industry

ZHANG Jiangtuo, YUE Long, WANG Bo

(State-owned Investment Jincheng Metallurgical Co. , Ltd. , Lingbao 472500 ,China)

**Abstract:** This paper investigates the application of hydrogen sulfide synthesis processes in copper smelting wastewater treatment. By comparing various hydrogen sulfide synthesis routes and traditional wastewater treatment methods such as sodium sulfide/sodium hydrosulfide sulfidation, neutralization, and combined processes, this study highlights the issues associated with the latter, including the introduction of sodium ions, the generation of large amounts of waste residue, high treatment costs, and unstable water quality. The research demonstrates that the methanol-sulfur synthesis process offers significant advantages in terms of cost, yield, and product purity. Taking a company's project as an example, this process can achieve a removal rate of over 99% for copper and arsenic ions in copper smelting wastewater, and over 95% for lead and zinc ions, enabling the treated wastewater to meet standards for reuse, reducing pollution and saving the company approximately 2 million yuan in wastewater treatment costs annually. Additionally, this study explores the challenges faced in practical applications, such as reaction temperature and pressure control, as well as requirements for raw material ratios and purity, and proposes corresponding strategies. The results indicate that the methanol-sulfur synthesis process is highly effective in copper smelting wastewater treatment, with future development focusing on catalyst research and the automation and intelligentization of the process.

**Keywords:** copper smelting wastewater treatment; hydrogen sulfide synthesis process; methanol-sulfur synthesis method; heavy metal ion removal; process optimization ▲

---

(上接第 90 页)

## Application of low-temperature waste heat recovery technology in copper smelting sulfuric acid systems

YUE Long, ZHANG Jiangtuo, CHEN Rujia

(State-owned Investment Jincheng Metallurgical Co. , Ltd. , Lingbao 472500 ,China)

**Abstract:** To address the issues of low energy utilization efficiency and ineffective recovery of low-temperature waste heat in copper smelting acid production systems, this study proposes an optimized waste heat recovery process based on thermal exchange principles. Through the application of key equipment including steam generators and high-temperature absorption towers, the system achieves cascade utilization of waste heat. By replacing production water with desalinated water, the quality of sulfuric acid is significantly improved. After commissioning of the recovery unit at SDIC Jincheng Metallurgy, steam production reached 40 t/h with annual economic benefits of approximately 26 million yuan. The system demonstrates effective control of equipment corrosion while reducing circulating water power consumption by 560 kWh/h. The research provides technical references for energy conservation and emission reduction in the copper smelting industry.

**Keywords:** copper smelting; acid production process; low-grade waste heat recovery; energy optimization; steam turbine power generation; equipment corrosion control ▲