

# 工业硅冶炼烟气脱硫生产实践

王忠顺 吕 钧 乐绍明

(芒市永隆铁合金有限公司, 云南 德宏 678400)

[摘 要] 为了使芒市永隆公司4条工业硅生产线的冶炼烟气排放满足现行国家及地方大气污染物排放标准,基于硅冶炼工艺,采用石灰石-石膏工艺进行脱硫改造。脱硫系统核心是SO<sub>2</sub>吸收系统、石灰石浆液制备和储存系统、石膏脱水系统。对比了脱硫前后烟气参数,结果表明,尾气SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放浓度均小于150 mg/Nm<sup>3</sup>,优于重点区域污染物排放要求;粉尘排放浓度小于50 mg/Nm<sup>3</sup>,达到国家及地方污染排放标准要求。

[关键词] 硅冶炼; 冶炼烟气; 脱硫; 石灰石-石膏工艺; 大气污染物; 二氧化硫; 氮氧化物

[中图分类号] TQ127.2 [文献标志码] B [文章编号] 1008-5122(2021)04-0025-04

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.04.006

## Operation Practice of Desulfurization in Silicon Smelting Off-gas

WANG Zhong-shun, LV Jun, LE Shao-ming

**Abstract:** In order to make the smelting flue gas emissions of the four industrial silicon production lines in Yonglong Company of Mangshi meet the current national and local air pollutant emission standards, based on the silicon smelting process, the limestone-gypsum process was used for desulfurization transformation. The cores of desulfurization system were SO<sub>2</sub> absorption system, the limestone slurry preparation and storage system, and the gypsum dehydration system. The flue gas parameters before and after desulfurization were compared. The results showed that the concentration of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in exhaust gas was less than 150 mg/Nm<sup>3</sup>, which was better than the emission requirements of pollutants in key areas. The dust emission was less than 50 mg/Nm<sup>3</sup>, which meet the national and local pollution emission standards.

**Key words:** silicon; smelting off-gas; desulfurization; limestone-gypsum process; air pollutants; SO<sub>2</sub>; NO<sub>x</sub>

## 0 前言

2010年,芒市永隆铁合金有限公司(以下简称“永隆”)新建4条15 000 kVA工业硅生产线,主工艺由备料、电炉熔炼、浇铸、产品破碎包装等工序组成,冶炼烟气经表冷器-旋风除尘器-高温布袋除尘处理后从烟囱排放。2011年,4条生产线陆续建设

完成,验收后转入生产,尾气满足当时的《工业炉窑大气污染物排放标准》(GB 9078—1996)、《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)排放要求。

截止目前,我国的产业政策没有对工业硅行业的相关污染物排放进行单独规定。工业硅行业污染物排放指标完全按照铁合金行业的标准执行。2012年,新标准《铁合金工业污染物排放标准》(GB 28666—2012)发布,该标准要求的现有企业大气污染物浓度限值并不包含烟气的硫、硝排放指标。工业硅生产烟气的硫、硝排放指标,主要按照企业所在地地方大气污染物排放标准执行。如果企业所在地无地方标准,则参考《大气污染物排放标准》(GB 16297—1996)执行。

2019年7月,生态环境部、国家发改委等四部

[收稿日期] 2021-04-19

[作者简介] 王忠顺(1982—),男,浙江建德人,本科,工程师,主要从事工业硅冶炼生产、技术管理与烟气净化处理工作。

[引用格式] 王忠顺,吕钧,乐绍明.工业硅冶炼烟气脱硫生产实践[J].有色冶金节能,2021,37(4):25-28.

委联合发布《工业炉窑大气污染综合治理方案》，要求加强工业炉窑大气污染综合治理，重点区域（京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原）的颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放限值分别不高于 $30\text{ mg/m}^3$ 、 $200\text{ mg/m}^3$ 、 $300\text{ mg/m}^3$ ；之后云南省生态环境厅、德宏州生态环监局陆续发布《云南省环境污染防治工作领导小组办公室关于印发云南省2019年大气、水主要污染物省级重点减排项目的函》和《关于加快推进全州硅冶炼企业脱硫建设及除尘改造工作的通知》。

基于上述背景，为了使二氧化硫、氮氧化物、粉尘等污染物排放均满足现行国家及地方大气污染物排放标准，2019年底，永隆对4条工业硅生产线进行烟气脱硫改造，要求颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放限值分别不高于 $50\text{ mg/m}^3$ 、 $550\text{ mg/m}^3$ 、 $240\text{ mg/m}^3$ ，且综合脱硫效率达到60%以上。

## 1 工业硅冶炼工艺概述

工业硅冶炼以硅石、石油焦、洗精煤、机制炭和少量木炭为原料，通过矮烟罩半封闭型15 000 kVA矿热电炉（共4条线），采用电热法生产工业硅。主工艺流程为：原料准备→洗矿→配料→加料→熔炼→精炼出炉→浇铸→精整→破碎→包装入库。精洗煤、木炭、石油焦满足入炉要求后送入各自料仓；硅石经破碎、水洗、筛分后由皮带输送机送入料仓。合格原料按工艺配比要求进行配料，同时配入一定量的木炭，混合后加入半封闭式矿热电炉。电能由变压器经三电极导入炉内，产生电弧热和电阻热，硅石得以还原成工业硅。在冶炼过程中，电极应平稳地埋入炉料中，使气体均匀从整个料面逸出。混匀的炉料随料面的缓慢下降而小批量地加入炉内，使炉内料面保持一定高度，在电极周围形成平圆锥体形状。炉内还原产生的硅水存到一定量后，用烧穿器打开炉眼，放出硅水及炉渣，同时从包底吹入氧气进行精炼，之后在锭模中浇铸。硅锭经冷却、初碎后，用轨道平板车运往成品车间，经精整、包装、分级后入库；炉渣经自然冷却后作为水泥生产原料外售。典型的工业硅生工艺流程如图1所示。

脱硫改造前，硅冶炼烟气经除尘系统除尘后排放，即烟气经电炉上方矮烟罩进入排尘烟道，经冷却器降温后进入旋风除尘器除去大颗粒粉尘，然后进入高温布袋除尘器，最后达标排放。备料工序产生的粉尘，经集气罩收集后通过管道引入除尘器；出

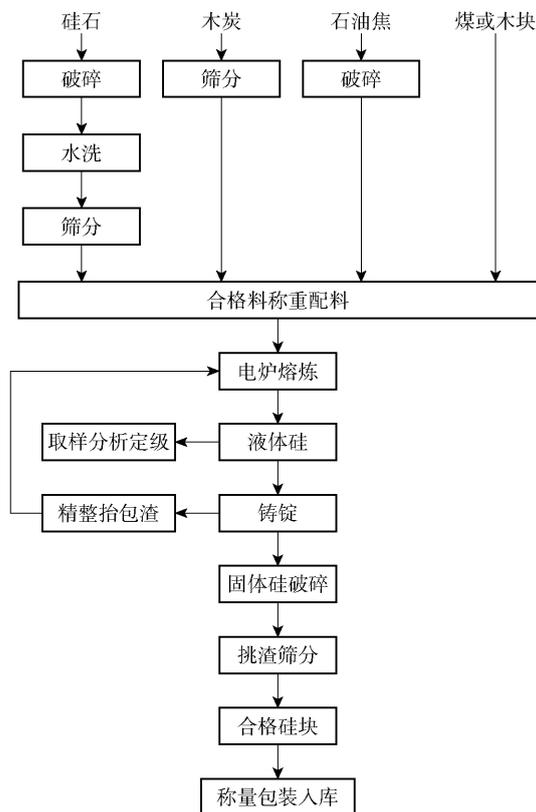


图1 典型工业硅生产工艺流程

硅、浇铸产生的烟气一并引入电炉烟气收尘系统进行处理。产品（金属硅）破碎产生的粉尘，经旋风除尘器和布袋除尘器回收金属硅尘后达标排放。表冷器、旋风除尘器收下的烟尘与高温布袋除尘器收集的尘灰（微硅粉）作为副产品出售，产品破碎除尘系统产生的粉尘（金属硅粉）与产品金属硅一起出售。产品金属硅满足《工业硅》（GB/T 2881—2014）的性能要求，其化学成分见表1；副产品微硅粉满足《电炉回收二氧化硅微粉》（GB/T 21236—2007）的性能要求，其化学成分见表2。

## 2 硅冶炼烟气脱硫改造

### 2.1 脱硫改造工艺

永隆的4条工业硅生产线在改造之前设布袋除尘器回收副产品微硅粉，烟气通过各自除尘器顶部的排气筒排放。2019年底，永隆对4条工业硅生产线进行烟气脱硫改造，将现有正压操作布袋除尘器出口烟气分别引出，用4台脱硫风机提高烟气压力、抵偿脱硫系统烟气阻力，原除尘风机正常使用。因此，永隆的4条工业硅生产线的除尘系统、脱硫系统均为正压操作，各自配备风机。目前，脱硫装置已经

运行一年多,系统稳定,烟气压力匹配良好。

表1 工业硅产品的化学成分(GB/T 2881—2014)

牌号	化学成分(质量分数)/%			
	名义硅含量	主要杂质元素含量		
		铁	铝	钙
Si1101	≥99.79	≤0.10	≤0.10	≤0.01
Si2202	≥99.58	≤0.20	≤0.20	≤0.02
Si3303	≥99.37	≤0.30	≤0.30	≤0.03
Si4110	≥99.40	≤0.40	≤0.10	≤0.10
Si4210	≥99.30	≤0.40	≤0.20	≤0.10
Si4410	≥99.10	≤0.40	≤0.40	≤0.10
Si5210	≥99.20	≤0.50	≤0.20	≤0.10
Si5530	≥98.70	≤0.50	≤0.50	≤0.30

注:名义硅含量不低于100%减去铁、铝、钙元素含量总和的值

表2 微硅粉产品的化学成分(GB/T 21236—2007)

牌号	化学成分(质量分数)/%			
	二氧化硅	主要杂质元素含量		
		氧化铁	氧化铝	氧化钙和氧化镁
SF96	≥96.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0
SF93	≥93.0	≤1.0	≤1.0	≤1.5
SF90	≥90.0	≤2.0	≤1.5	≤2.0
SF88	≥88.0	—	—	—
SF85	≥85.0	—	—	—

为控制造价,脱硫装置采用典型两炉一塔的配置,新建两座吸收塔,每座吸收塔处理两条生产线的烟气,脱硫后的两股净烟气汇合到一座60 m高的烟囱排放至大气。脱硫采用石灰石-石膏工艺,主要由烟气系统、SO<sub>2</sub>吸收系统、石灰石浆液制备和储存系统、石膏脱水系统、工艺水、压缩空气等系统组成<sup>[1-2]</sup>。脱硫系统工艺流程如图2所示。其中,SO<sub>2</sub>吸收系统、石灰石浆液制备和储存系统、石膏脱水系统是脱硫系统的核心。

### 2.1.1 SO<sub>2</sub>吸收系统

从布袋除尘器出来的烟气SO<sub>2</sub>浓度约为1 300 mg/Nm<sup>3</sup>,最高不超过2 000 mg/Nm<sup>3</sup>,采用一级脱硫吸收塔即可满足去除烟气中SO<sub>2</sub>的要求。烟气经过脱硫风机进入吸收塔后,90°折向朝上流动,与自喷淋层而下的浆液进行接触,因液气比较大,烟气中的SO<sub>2</sub>被吸收浆液洗涤,并与浆液中的CaCO<sub>3</sub>发生化学反应<sup>[3]</sup>,生成CaSO<sub>3</sub>·1/2H<sub>2</sub>O,接着在吸收塔

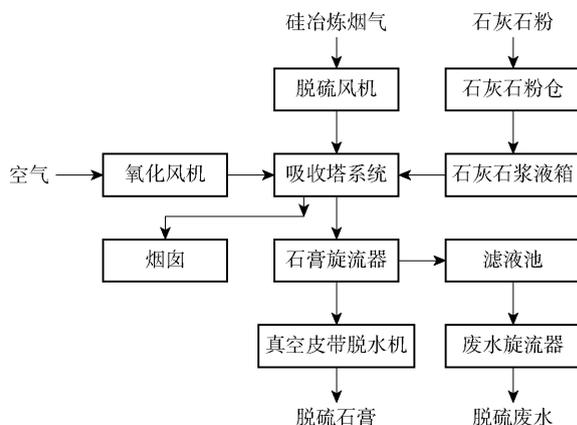


图2 脱硫系统工艺流程框图

内部被氧化成CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O,从浆液中析出结晶。系统向吸收塔内连续补充新鲜CaCO<sub>3</sub>浆液,同时连续外排一定量的CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O浆液。

1) 吸收塔的循环系统配3台循环泵,每台循环泵与喷淋层上升管道系统相连接,从而保证吸收塔内200%以上的吸收浆液覆盖率。运行的循环泵数量根据吸收浆液流量来选定,以达到既定的吸收效率<sup>[4]</sup>,同时可根据实际运行时烟气流量、SO<sub>2</sub>浓度的变化调整运行循环泵台数。

2) 吸收塔喷淋层上部布置一级折流板除雾器和一级管式除尘器,用以脱除烟气中烟尘和气流中夹带的雾滴。处理后烟气通过60 m烟囱排向大气。

3) 吸收塔浆液和管式除尘器在线冲洗水流入吸收塔底部,即吸收塔浆液池。通过吸收塔浆液池上3台侧入式搅拌器的搅拌,浆液池中的固体颗粒保持悬浮状态。吸收塔底部的强制氧化喷枪为吸收塔提供氧化空气,把脱硫反应生成的CaSO<sub>3</sub>·1/2H<sub>2</sub>O氧化为CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O,并生成石膏晶体<sup>[5]</sup>。2套脱硫装置的2座吸收塔共配置3台相同规格的氧化风机(2运1备)以及配套的风道、氧化空气喷枪等。空气喷管设于搅拌器前侧,喷入的空气被搅拌器推动的浆液搅碎成细小的气泡,并随着浆液的流动,均匀地分散于浆液之中。

### 2.1.2 石灰石浆液制备和储存系统

石灰石粉由罐车运输至脱硫区,通过气力输送至钢制石灰石粉仓内,再由星形给料机、称重给料机送至石灰石浆液箱。石灰石粉和工艺水在石灰石浆液箱内混合,制成含固量约25%的石灰石浆液。新鲜石灰石浆液被泵送入吸收塔,补充的石灰石浆液量由吸收塔塔内浆液的pH值控制。

### 2.1.3 石膏脱水系统

石膏脱水系统包括石膏旋流器、真空皮带脱水机、废水旋流器。

1) 吸收塔排出的石膏浆液进入石膏旋流器分级,旋流器底流浓度 50% 左右的浓浆液流至真空皮带脱水机。旋流器顶溢流的固含量约 5% 的浆液送至滤液池。

2) 真空皮带脱水机系统包括 1 台真空皮带脱水机、2 台水环式真空泵、1 台气液分离器。浓石膏浆液从石膏旋流器底流自流到真空皮带脱水机过滤面上,经真空脱水、洗涤后,石膏卸入石膏堆料间。脱水机的滤液经气液分离器后,流入滤液池中。

3) 设 1 台废水旋流器,从滤液中分离出脱硫废水,将旋流器溢流的含尘废水集中储存在废水箱,送至区域外处置。

## 2.2 脱硫系统改造后运行指标

脱硫系统改造前后的主要烟气参数见表 3,改造后的脱硫系统的主要消耗和产出见表 4。

表 3 脱硫系统改造前后的主要烟气参数

烟气参数	烟尘含量/ mg·Nm <sup>-3</sup>	SO <sub>2</sub> 浓度/ mg·Nm <sup>-3</sup>	NO <sub>x</sub> 浓度/ mg·Nm <sup>-3</sup>	烟气温度/°C
脱硫前	约 100	约 1310	—	120 ~ 160
脱硫后	约 30	约 100	约 120	约 45

表 4 脱硫系统(两套)主要消耗和产出

项目	工艺水消耗量/ m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	电耗/ kW·h·h <sup>-1</sup>	仪表风消耗/ Nm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup>	石灰石粉消耗量/ t·d <sup>-1</sup>	脱硫废水产量/ m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	石膏产量/ t·h <sup>-1</sup>	定员/人
数量	46 ~ 51	1 600 ~ 1 830	2.5 ~ 3.0	22 ~ 36	约 2.4	约 2.56	7

由表 3 可知,脱硫系统改造后,尾气中二氧化硫排放浓度和氮氧化物排放浓度均小于 150 mg/Nm<sup>3</sup>,优于重点区域污染物排放要求;粉尘排放浓度小于 50 mg/Nm<sup>3</sup>,达到国家及地方污染排放标准要求。根据表 4 核算,本次改造布袋除尘器、增加脱硫装置后,折合每吨金属硅增加生产成本约 360 元。

## 3 结束语

芒市永隆铁合金有限公司作为云南德宏州最大的工业硅生产企业,本次环保改造的完成促进了德宏地区的生态环境改善,对地区的工业硅生产企业起了良好的示范作用;在推进硫、硝、尘排放治理进程的同时,也为工业硅行业污染物排放标准的制定

提供数据支撑。

### [参考文献]

- [1] 邵峰,戎淑群.湿法烟气脱硫工艺系统介绍与分析[J].能源工程,2005(5):42-47.
- [2] 姜欣.石灰石-石膏湿法脱硫技术在燃煤电厂中的应用[J].黑龙江环境通报,2011,35(1):48-50.
- [3] 王凤朝.锌冶炼工厂含硫尾气采用氧化锌法脱硫的技术分析[J].有色冶金节能,2013,29(5):44-48.
- [4] 张雪杰.湿式石灰石-石膏法烟气脱硫系统的仿真设计[D].保定:华北电力大学,2008.
- [5] 李正福,陈君明.国内首套“两机一塔”湿法脱硫控制系统的设计与实践[C]//第六届 ABB 杯全国自动化系统工程师论文大赛论文集.长沙,2013.