

Treatment of Sulfur-rich Flue Gas by Activated Coke Desulfurization and Denitrification

Yaning Ye

MCC Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., Beijing, 100176, China

Abstract

This paper summarizes the process principle and development status of desulfurization and denitrification of sintering flue gas by activated coke method, analyzes the pretreatment process of sulfur-rich flue gas decomposed by activated coke in the process of desulfurization and denitrification, discusses the process principles and processes of preparing different sulfur by-products from sulfur-rich flue gas by using vanadium catalyst as contact acid, wet method of sodium pyrosulfates, compound amine method of liquid SO₂ and ammonia method of ammonium sulfate, and compares and analyzes the advantages, disadvantages and application effects of four processes for producing sulfur by-products. Then, according to the present situation and development trend of sintering flue gas treatment in China, it is pointed out that the production of sulfur-containing by-products of ammonium sulfate by ammonia method from sulfur-rich flue gas is a treatment method with good development prospect. This process achieves the emission reduction and recycling of SO₂ from sintering flue gas through the treatment of sulfur-rich flue gas, and realizes the recycling of pollutants.

Keywords

activated coke; desulfurization and denitrification; sulfur-rich flue gas; sulfur recovery

烧结活性焦脱硫脱硝富硫烟气处理工艺分析

叶亚宁

中冶京诚工程技术有限公司, 中国 · 北京 100176

摘 要

论文概述了烧结烟气活性焦法脱硫脱硝的工艺原理及发展状况, 分析了活性焦脱硫脱硝工艺过程中活性焦解析出富硫烟气的预处理过程, 论述了钒催化剂接触法制酸、湿法制焦亚硫酸钠、复合胺法制液体SO₂和氨法制硫酸铵四种以富硫烟气为原料制备不同硫副产品的工艺原理及流程, 对比分析了四种生产硫副产品工艺的优缺点和应用效果。随后, 根据中国烧结烟气治理发展的现状和趋势, 指出富硫烟气氨法生产硫酸铵含硫副产品是一种具有很好发展前景的处理方式, 该工艺通过对富硫烟气的处理达到烧结烟气SO₂的减排和回收利用, 实现污染物的资源化。

关键词

活性焦; 脱硫脱硝; 富硫烟气; 硫回收

1 引言

钢铁工业是发展国民经济和国防建设的支柱产业, 但存在能耗高、污染严重的问题, 其排放量占有工业排放量的 16%^[1]。中国的钢铁行业主要是以高炉——转炉长流程型为主导, 高炉炉料中烧结矿的占比在 80% 以上^[2]。钢铁生产过程中产生的污染物 40%~60% 的 SO₂ 和 48% 的 NO_x 都是来自烧结工序^[3], 因此对烧结烟气脱硫脱硝处理十分必要。烧结烟气中除了含有 SO₂、NO_x 外, 还含有 CO_x、HF、二噁英 (PCDD)、呋喃 (PCDF) 等多种有害气体污染物, 与其他工业烟气相比具有烟气量大、含尘量高、成分复杂等特点。目前, 烟气脱硫脱硝技术主要有活性焦吸附法、低温催

化还原法、氧化法、循环流化床联合脱硫脱硝法等^[4-6]。其中, 活性焦吸附法具有能够同时对 SO₂、NO_x 的脱除, 工艺过程中不消耗水, 也不会产生废水, 对污染物也可以进行回收利用, 降低系统的运行成本等优势^[5], 活性焦净化技术是一种不会产生二次污染的清洁保护技术。

经过多年的发展, 中国钢铁行业对烟气脱硫脱硝取得了很大的突破, 对烟气的末端处理建设了大量的烟气脱硫设施。根据脱硫剂类型将烟气脱硫技术分为湿法脱硫、半干法脱硫和干法脱硫三大类, 其中半干法和湿法脱硫技术在钢铁行业应用的较早且广泛, 脱硫副产物主要成分为亚硫酸钙和硫酸钙 (石膏), 但随着近年市场饱和, 烧结烟气脱硫副产物大量堆积无法处理, 造成硫资源浪费, 不符合环保和循环经济的发展理念^[10]。而干法脱硫技术则是采用多孔吸附材料活性焦作为脱硫剂, 利用活性焦高吸附性和再生性能实现对烟气中 SO₂ 的脱除, 同时在活性焦解析再生过程中得到

【作者简介】叶亚宁 (1980-), 中国安徽桐城人, 硕士, 高级工程师, 从事钢铁冶金研究。

富硫烟气实现对SO₂的回收利用，因此干法脱硫技术在烧结烟气脱硫领域得到广泛的研究和应用。但当前的烟气净化措施重点在于脱除SO₂、NO_x后排放达标烟气，SO₂的高效资源化利用严重不足。论文主要论述了烧结烟气采用活性焦脱硫脱硝技术将烟气中SO₂脱除、富集、解析气体净化后加工生产含硫副产品，实现污染物的资源化。

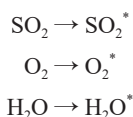
2 活性焦富硫烟气特点及处理

2.1 活性焦脱硫脱硝机理

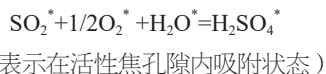
活性焦脱硫脱硝技术具有可资源化、宽谱净化、节水与硫回收等特征，是一种多污染物协同净化技术。利用活性焦对二氧化硫良好的物理和化学吸附性能在较低的温度下对烟气中SO₂和NO_x进行吸附净化，吸附饱和的活性焦通过加热至较高温度使吸附的二氧化硫重新释放出来实现活性焦吸附活性的再生。

脱硫原理：活性焦烟气脱硫是物理吸附和化学吸附两个过程。首先，烟气中SO₂扩散到活性炭孔隙的物理吸附。其次，在活性炭作用下，二氧化硫与烟气中的水、氧气发生化学反应生成吸附态硫酸^[7,8]。活性焦脱硫主要反应式如下：

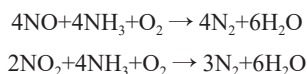
物理吸附：



化学吸附：



脱硝原理：在脱硫后的烟气中喷入还原剂NH₃，在活性炭的催化作用下，烟气中的NO_x与NH₃发生反应生成N₂，实现烟气的脱硝^[8,9]。活性炭脱硝主要反应式如下：



2.2 活性焦解析的富硫烟气特点

从吸附塔排出的活性炭物理吸附了SO₂、H₂O、O₂和各种碳氢化合物，吸附饱和后的活性焦送入解吸再生塔，通过加热解吸再生，释放出富含SO₂的气体。活性焦再生解析的反应式如下：



活性焦通过给料仓加入解析塔料仓，这里的下料密封系统与吸附塔是相同的。活性焦通过单元系统进入一排换热管换热器，这一区域被称为“加热段”。在换热管中，活性焦将被加热到390℃~450℃。随后SO₂与活性焦一起进入脱气段，然后进入下一道工序。为了使活性焦的温度降到燃点以下，活性焦第二次通过换热器冷却，这一区域被称为“冷却段”。活性焦集料区域在冷却段下部，活性焦通过与吸附塔相同的排料装置排出解析塔，只是这里的排出量比吸收塔更大。

活性焦解析出的富硫烟气(sulfur-rich flue gasSRG烟气)的特点是：温度高、含尘高、SO₂含量高、CO₂含量高、含水率高、烟气中不含O₂，烟气杂质成分复杂、气量小等特点。解析塔出口烟气条件如表1所示。

表1 解析塔出口烟气条件表

项目	操作范围	设计点	单位
SO ₂	8~15	10	Vol % (dry) (干态)
SO ₃	0~0.5	0.4	Vol % (dry) (干态)
NH ₃	~4	3.5	Vol % (dry) (干态)
HCl	~2	1.6	Vol % (dry) (干态)
HF	0~1	0.2	Vol % (dry) (干态)
CO	0.5~4	0.8	Vol % (dry) (干态)
CO ₂	1~9	6	Vol % (dry) (干态)
N ₂	35~80	77.5	Vol % (dry) (干态)
H ₂ O	20~40	33	Vol % (湿态)
Dust	15~30	~20	g/Nm ³ (dry) (干态)
温度	300~390	360	℃

2.3 解析烟气净化过程

解析烟气净化的主要作用是净化SRG烟气，除尘、降温以及去除烟气中的有害物质以满足后续工序对烟气成分要求。

采用流程为“一级逆喷洗涤器→填料塔冷却→二级逆喷洗涤器→两级电除雾器”的绝热蒸发稀酸洗涤工艺流程。粉尘过高也可以在前端加入喷淋塔以达到降低管道堵塞风险。

在360℃左右，含尘20g/Nm³的高温烟气首先进入一级逆喷洗涤器与上喷的循环液相接触，洗去其中的大部分尘、HF、HCl等杂质后，经过气液分离，炉气温度降至约83℃左右；再进入填料洗涤塔进行进一步洗涤，填料洗涤塔的循环液并通过稀酸板式换热器冷却，从填料洗涤塔出来的烟气大部分杂质已除，同时烟气温度降到临近38℃附近，从填料洗涤塔出来的烟气进入第二逆喷洗涤器，在低温下进一步洗涤烟气中的重金属(如Hg)等有害杂质，自第二级逆喷洗涤器出的烟气绝大部分杂质已被清除。再经过二级电除雾器除去酸雾，使烟气中的酸雾含量降至0.005g/Nm³。

由一级逆喷洗涤器洗涤循环泵引出部分循环液去斜管沉降器，斜管沉降器的上清液返回一级逆喷洗涤器循环，底流去地下沉降池沉降。烟气中的灰尘绝大部分在一级逆喷洗涤器中被洗涤下来。为维持净化工段各循环槽的液位，填料洗涤塔循环槽自动串至一级逆喷洗涤器循环槽，二级逆喷洗涤器循环槽的多余稀酸自动溢流至填料塔循环槽内，逆喷洗涤器、填料洗涤塔均采用单独的循环系统。

对于活性焦解析过程中释放出来的富硫烟气的处理成为该技术是否真正实现二氧化硫减排的关键。

3 富硫烟气资源化利用生产副产品四种工艺

3.1 利用富硫烟气生产硫酸工艺

解析烟气经烟气净化工段净化后，送入制酸装置干吸工段干燥塔，经干燥塔干燥后烟气中水分去除并将氧气浓度调节到要求范围，符合要求的烟气经二氧化硫鼓风机升压送往转化工段。

转化工段将烟气中 SO₂ 在钒催化剂作用下转化为 SO₃，SO₃ 气体送往干吸工段吸收制成硫酸。制酸流程详如图 1 所示。

制酸转化采用 3+1, III I - II IV 两次转变化热工艺流程，干燥吸收工段流程采用“塔—槽—泵—器—塔”的循环流程，干燥、吸收。

SRG 烟气经净化工段及干燥塔后进入转化工段，在钒触媒的催化作用下烟气中的 SO₂ 转化为 SO₃，在干吸工段用浓酸吸收后生成产品 98% (93%) 浓硫酸。要求总转化率不低于 99.75%。出二吸塔的制酸尾气返回脱硫脱硝系统进一步做脱硫处理，无制酸尾气向大气中直排。

来自 SO₂ 鼓风机的烟气依次经过第 III 换热器及第 I 换热器，与三段、一段出口的高温转化气换热后，进入转化器一段、二段、三段转化。出三段的 SO₃ 气体经 III 换热器换热后，再进入吸收塔吸收 SO₃；出吸收塔气体进入 IV 换热器后再去 II 换热器换热后去转化四段反应。出四段转化烟气经 IV 换后去二吸塔将三氧化硫吸收，出二吸收塔的尾气中二氧化硫的含量小于 600mg/Nm³。

制酸干吸工段采用干燥、吸收循环均设置独立循环槽，均采用立式循环酸槽。通过串酸、加水 and 产出成品酸来维持各塔循环酸浓度和循环槽的液位，转化后的含 SO₃ 烟气在干燥吸收工段被浓酸吸收后生成产品 98% 硫酸。其中，干吸工段 SO₃ 吸收率 ≥ 99.95%。

93% 或 98% 成品硫酸分别由干燥塔或吸收塔循环泵出口引出，经成品酸冷却器冷却后经电磁流量计计量后，送至成品贮酸罐贮存，经装车高位槽后装车外运。浓硫酸主要生产指标详见表 2。

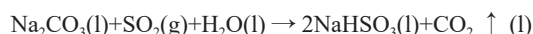
表 2 浓硫酸 (工业一等品) 主要生产指标 (GB/T534—2002)

项目	质量指标
硫酸 (H ₂ SO ₄) 的质量分数 /%	≥ 92.5 或 98.0
灰分的质量分数 /%	≤ 0.03
铁 (Fe) 的质量分数 /%	≤ 0.010
砷 (As) 的质量分数 /%	≤ 0.005
汞 (Hg) 的质量分数 /%	≤ 0.01
铅 (Pb) 的质量分数 /%	≤ 0.02
透明度 /mm	≥ 50
色度 /mL	≤ 2.0

3.2 利用富硫烟气生产焦亚硫酸钠工艺

利用富硫烟气制焦亚硫酸钠副产品时，解析烟气经过净化工段净化达标后送入焦亚硫酸钠生产装置的鼓风机 (压缩机) 升压，再进入合成工序反应生成焦亚硫酸钠，焦亚硫酸钠生产工艺主要包含配碱工序、合成工序、分离干燥包装工序。焦亚硫酸钠工艺图流程如图 2 所示。

焦亚硫酸钠工艺系统初次运行时，首次配碱用纯水配制纯碱溶液，纯碱溶液与 SO₂ 烟气反应，反应方程式如下：



焦亚硫酸钠工艺系统运行正常后，由离心机分离出来的溶液为饱和亚硫酸氢钠溶液，作为母液用于配碱，与纯碱反应，反应化学方程式如下^[11]：

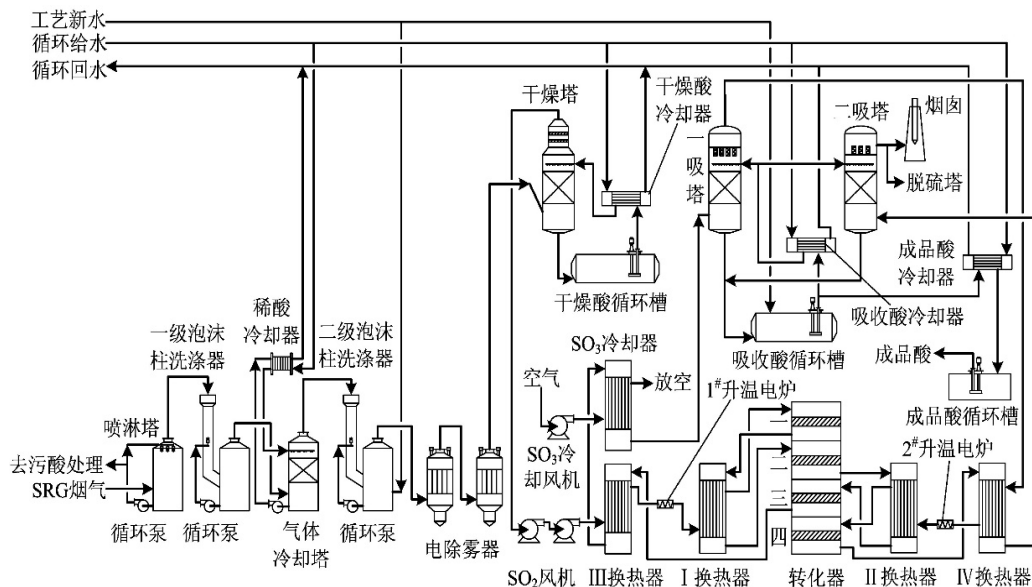
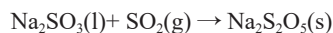
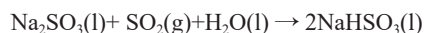
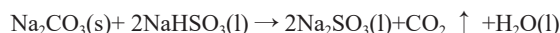


图 1 SRG 烟气制酸流程

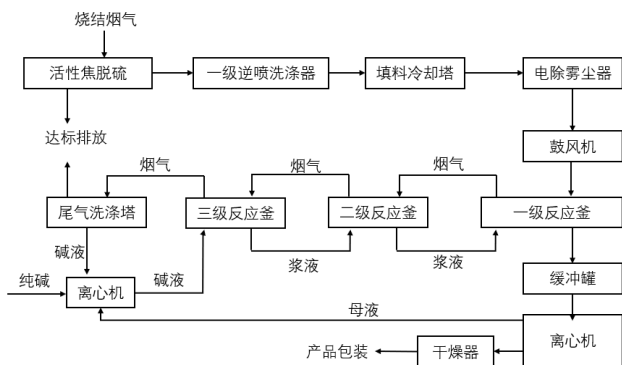


图2 生产焦亚硫酸钠流程工艺图

湿法制焦亚硫酸钠的工艺中，来自净化工序的 SO_2 富集气依次进入一级反应釜、二级反应釜、三级反应釜，经过3台串联反应釜鼓泡式吸收反应后， SO_2 基本吸收完全，吸收率达到99.9%。合成工序的尾气送入尾气处理工序。 SO_2 富集气在一级反应釜内与亚硫酸钠浆液反应生成焦亚硫酸钠结晶，反应完成后，关闭进气阀，放出部分结晶浆液到内，以待放入离心机进行固液分离。由二级反应釜放出部分浆液将一级反应釜液位补充到正常液位，同样三级反应釜排放液补充二级反应釜，三级反应釜由配碱罐补充，各个反应釜液位正常后，再次打开进气阀恢复生产，这样为一个生产循环^[12]。

缓冲罐内浆液放入离心机进行固液分离，分离出液体为亚硫酸氢钠饱和溶液，送入配碱工序作为配碱母液使用。分离出 $\text{W}(\text{H}_2\text{O})$ 约5%的湿焦亚硫酸钠，通过螺杆输送到干燥器内，用160℃左右的热风进行干燥，干燥后的焦亚硫酸钠成品称重包装，送入仓库堆放储存。焦亚硫酸钠产品要求详见表3。

表3 焦亚硫酸钠产品要求

指标名称	指标
焦亚硫酸钠(以 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 计) / %	≥ 97.0
SO_2 / %	≥ 66.0
PH	≤ 4.4~4.6
铁(Fe)含量 / %	≤ 0.003
砷 / %	≤ 0.0001
重金属(以Pb计) / %	≤ 0.0005

由离心机分离出的亚硫酸氢钠溶液母液送入配碱罐内，固体纯碱根据溶液量添加，搅拌后使酸碱中和完全反应。通过添加纯水来调整配制的浆液粘稠度、pH值和比重等参数，配好的碱液根据合成工序的需要，适时补充到三级反应釜。

3.3 利用富硫烟气生产液体 SO_2 工艺

富硫 SRG 烟气经净化工段净化达标后由风机送入复合胺吸收塔，吸收后的气体从吸收塔顶引出送回活性焦脱硫系统。在吸收塔上部喷入复合胺吸收液贫液，未吸收 SO_2 的复合胺溶液称为贫液，吸收液在吸收塔内与含 SO_2 烟气充分接触，将烟气中 SO_2 气体吸收下来。吸收 SO_2 后的复合胺溶液称为富液，富液从吸收塔底部引出送入富液罐，从富液罐经富液泵加压后进入贫富液换热器，与热贫液换热后进入解析塔解析。富液在解析塔里经过填料层后进入再沸器，继续加热解析成为贫液。工艺流程图如图3所示。

从解析塔内解析出的 SO_2 随同蒸汽由解析塔塔顶引出，进入冷凝器，冷却至一定温度，送至分离器，分离出大部分水分后的高纯 SO_2 气体，送往液体二氧化硫工段制取液体二氧化硫。

生产过程包括两个工段：二氧化硫气体提纯工段、液体二氧化硫工段。

第一，二氧化硫气体提纯工段主要包含吸收系统、解

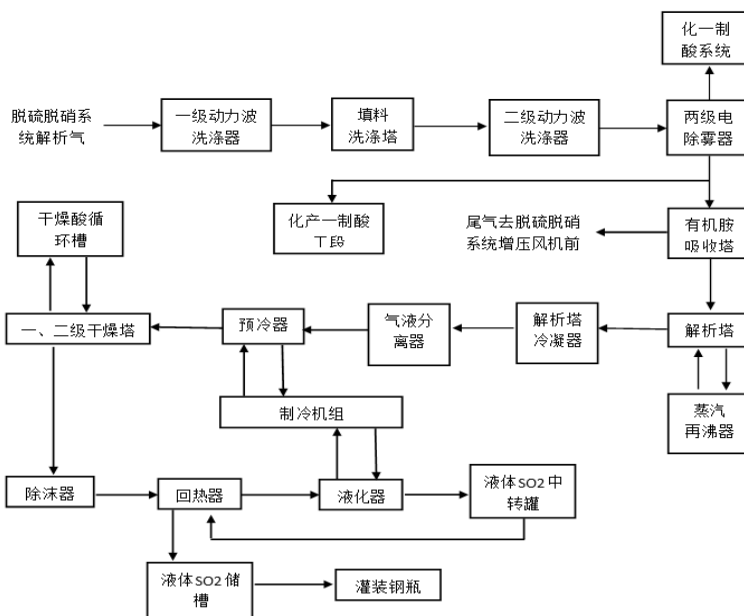


图3 液体二氧化硫工艺流程图

析系统和吸收液净化系统三个系统。

①吸收系统。经净化后富硫 SRG 烟气从吸收塔底部进入，烟气与吸收塔内吸收液逆向接触，将烟气中 99% 以上 SO₂ 吸收下来，吸收后尾气送入活性炭脱硫系统。

经吸收反应后，富含 SO₂ 的富液由富液输送泵送至富液储槽，再通过富液进液泵送至贫富液热交换器与贫液进行热交换，升温至 85℃ 左右后进入 SO₂ 解析塔。

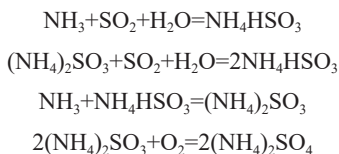
②解析系统。吸收液解析也可称为再生，主要完成 SO₂ 的解析过程，解析温度决定了解析的深度，吸收 SO₂ 的富液的解析温度为 105℃ 左右。解析出的 SO₂ 饱和气体进入冷凝器，将 SO₂ 气体温度降低到约 40℃，在脱除大部分水后送往液体二氧化硫工段。再生后的高温贫液（约 105℃）与出吸收塔的富液进行热交换，再进入冷却器通过循环冷却水将贫液温度降至约 45℃ 后返回贫液槽。

③吸收液净化系统。将定量的吸收液送入吸收液过滤装置，对吸收液中固体悬浮物进行过滤和清除，以保证系统含固量的稳定。将过滤后的清液部分 / 全部送入热稳定盐净化系统，对吸收液系统中富集的热稳定盐进行去除，使其保持在一定的浓度范围。

第二，液体二氧化硫工段。二氧化硫气体提纯工段取得的高纯 SO₂ 气体含有一定水分，经一级干燥塔、二级干燥塔浓硫酸干燥吸收水分，干燥后 SO₂ 气体在预冷器降温后除掉部分饱和水，再进入制冷压缩机，压缩到 0.8MPa，送入 SO₂ 液化器液化，液化后的液体 SO₂，再送 SO₂ 储罐贮存。

3.4 利用富硫烟气生产硫酸铵工艺

富硫烟气经过净化工段净化达标后送入硫酸铵生产装置脱硫塔中，脱硫塔通过氨水为吸收剂，在脱硫塔内经过吸收、浓缩、氧化、脱水、除雾等一系列工序，液硫酸铵溶液再经过分离、干燥等过程，生产出硫酸铵产品。SO₂ 在吸收工序主要发生的化学反应如下^[13,14]：



典型的氨—硫酸铵法脱硫工艺流程如图 4 所示。烟气由脱硫塔中下段进入，氨化的吸收循环液与烟气中的 SO₂ 反应，生成的 (NH₄)₂SO₃、NH₄HSO₃ 随吸收液落入塔底，塔底通入氧化空气将 (NH₄)₂SO₃ 氧化成 (NH₄)₂SO₄，生成 (NH₄)₂SO₄ 再经过浓缩、结晶、分离等工艺处理后得到 (NH₄)₂SO₄ 产品。

4 利用富硫烟气生产副产品工艺分析

①制酸工艺成熟稳定，用途广泛。但是在选择制酸转化工艺的时候，除了采用二转二吸工艺流程外还可以选择一转一吸工艺流程。相比于二转二吸工艺流程，一转一吸工艺流程设备少、占地面积小、投资成本更低，但是再生烟气制

酸后产生的硫酸尾气 SO₂ 浓度要高于二转二吸，在返回脱硫吸附系统时会增加活性焦的消耗量，要定期补充。因此转化工艺流程的确定应结合两者利弊，对于制酸规模大于 15kt/a 以上的装置建议选择二转二吸转化流程。

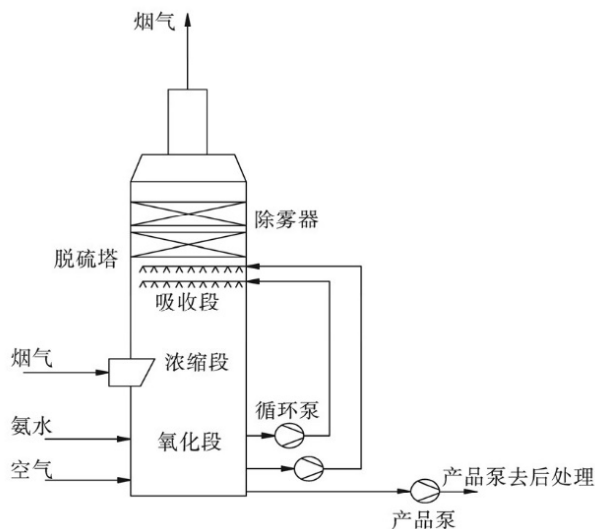


图 4 氨法脱硫工艺流程

②目前中国制焦亚硫酸钠主要方式是硫磺燃烧制得 SO₂ 原料气，这种方式得到的 SO₂ 气体浓度较低，φ(SO₂) 为 10%~13%，同时还会含有燃烧过量的 O₂，高温下容易产生升华硫，升华硫在遇管道温度降低后易堵塞管道设备。但烟气活性焦脱硫解析回收的 SO₂ 气体为原料气制焦亚硫酸钠工艺中，脱硫富集气中 SO₂ 含量，净化洗涤出水后干基 φ(SO₂) 高达 37%，同时烟气中不含 O₂，具有 SO₂ 浓度高、总烟量相对较小、设备总投资减少和反应时间缩短等优点。

③国内生产液体二氧化硫的方法常用的是复合胺法。复合胺法是一种可再生工艺，工艺流程简单、运行可靠、吸收液可再生循环利用，损耗低，生产出来的液体二氧化硫浓度可达到 99.5% 以上，甚至可达到食品级应用，售价相对较高，综合经济指标具有明显的优势，但销售半径较小，不太方便长途运输。

④氨法生产硫酸铵工艺中，氨水为 SO₂ 吸收剂，氨的活性高，脱硫过程中化学反应迅速，烟气与氨水的接触时间较短，因此该工艺具有脱硫塔体积小、占地面积小、投资低等优势。

5 结语

活性焦脱硫脱硝是一种不会产生二次污染的环保技术，活性炭的吸附和催化作用可以脱除 SO₂ 和 NO_x，吸附饱和的活性炭解析再生实现循环利用，同时高浓度 SO₂ 解析气用来生产含硫副产品可以创造更高的经济效益。

论文介绍四种利用富硫烟气生产副产品工艺中，制酸最为普遍被较多的企业采用，工艺比较成熟，但硫酸的收益不高；焦亚硫酸钠和液体 SO₂ 用途比较广泛、经济效益高，

但市场范围小；制硫酸铵工艺钢铁企业目前应用较少，但是该工艺投资小，硫酸铵溶液可为焦化厂硫铵工段利用、硫酸铵产品可作化肥，具有可观的经济效益。

利用 SRG 烟气制酸、制焦亚硫酸钠、制液态二氧化硫以及生产硫酸铵等含硫副产品，原料是废气利用，既可减少污染物排放，又可生产钢铁企业所需的含硫副产品，实现了节能减排和硫资源的循环利用，给含硫废气处理提供了新的综合治理方案。

参考文献

- [1] 王俊杰,赵文书,余雪峰,等.CSCR活性炭脱硫脱硝系统烟气流分布数值模拟[J].烧结球团,2021,46(4):84-91.
- [2] 李惠莹,王浩,金保昇.浅谈烟气循环烧结工艺的发展现状及趋势[J].烧结球团,2018,43(1):61-65.
- [3] 潘建,王颖钰,朱德庆,等.氧化烧结烟气联合氨——硫铵法同时脱硫脱硝工艺及脱硝机理研究[J].烧结球团,2018,43(3):69-73.
- [4] 陈凯华,宋存义,张东辉,等.烧结烟气联合脱硫脱硝工艺的比较[J].烧结球团,2008(5):29-32.
- [5] 廖继勇,周末,李小敏.活性炭净化技术在烧结烟气治理领域的应用[J].烧结球团,2012,37(4):61-63.
- [6] 史夏逸,董艳苹,崔岩.烧结烟气脱硝技术分析比较[J].中国冶金,2017,27(8):56-59.
- [7] 柴田宪司,山田森夫,森本启太.活性炭移动层式烧结机烟气处理技术[J].山东冶金,2010,32(3):1-2+7.
- [8] 崔岩,朱繁,董艳苹,等.活性炭脱硫脱硝技术在烧结烟气治理中的应用[J].硫酸工业,2021(6):44-48.
- [9] 苏玉栋,李咸伟,范晓慧.烧结过程中NO_x减排技术研究进展[J].烧结球团,2013,38(6):41-44+54.
- [10] 涂瑞,李强,葛帅华.太钢烧结烟气脱硫富集SO₂烟气制酸装置的设计与运行[J].硫酸工业,2012(2):26-30.
- [11] 卢建光,阎占海,邵久刚,等.逆流式活性炭净化烟气工艺在邯钢烧结机的应用[J].中国钢铁业,2019(3):52-54.
- [12] 杜江,郎学云,丁云朋.钢厂烧结烟气硫资源化回收制焦亚硫酸钠[J].硫酸工业,2018(6):24-27.
- [13] 高峰,齐慧敏,方向晨.烟气氨法脱硫脱碳技术研究进展[J].当代化工,2021(5):1243.
- [14] 李露,黄帮福,张桂芳,等.氨法脱硫副产物硫酸铵蒸发结晶研究与进展[J].现代化工,2020,40(4):36-40.