

焦炉烟道废气治理“钙基超细粉干法脱硫+除尘+脱硝” 工艺流程及应用经济效益

梁晓冬 杨晓琳 王婷云 于 娇 (辽宁冶金设计研究院有限公司, 辽宁 鞍山 114000)

摘要: 《炼焦化学工业废气治理工程技术规范 (HJ 1280-2023)》中 6.3.4 部分列举了五种焦炉烟道废气治理典型工艺流程, 本文提出“钙基超细粉干法脱硫+除尘+脱硝”工艺流程并与其中三种工艺流程进行对比分析, 采用流态化高活性氢氧化钙粉的钙基超细粉干法脱硫, 脱硫烟气温度适用范围广, 脱硫烟气二氧化硫浓度适用范围广, 脱硫灰可循环利用、降低钙硫比从而降低运行成本。脱硫副产物处理相对容易, 具有较大的市场应用前景。

关键词: 脱硫适用范围; 运行成本; 经济效益

中图分类号: X784

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 035-0069-03

Coke Oven Flue Gas Treatment Process of ‘Calcium-Based Superfine Powder Dry Desulfurization + Dust Removal + Denitrification’ and Its Application Economic Benefits

Liang Xiaodong, Yang Xiaolin, Wang Tingyun, Yu Jiao (Liaoning Metallurgical Design and Research Institute Co., Ltd., Anshan, Liaoning, 114000, China)

Abstract: The “Technical Specification for Pollution Control Engineering of Waste Gas in the Coking Chemical Industry (HJ1280-2023)” outlines five kinds typical process flow charts for coke oven flue gas treatment in Section 6.3.4. This paper proposes a “calcium-based superfine powder dry desulfurization + dust removal + denitrification” process flow and compares it with three other process flows. The proposed process uses fluidized, high-activity calcium hydroxide powder for dry desulfurization. It offers a wide range of applicability for both flue gas temperature and sulfur dioxide concentration. Additionally, the desulfurization ash can be recycled, the calcium-to-sulfur ratio can be reduced, and operational costs can be lowered. The treatment of desulfurization by-products is relatively straightforward, showing promising market potential.

Keywords: Desulfurization Applicability Range; Operating Costs

1 前言

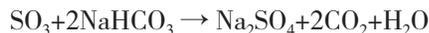
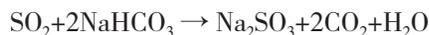
目前, 焦炉烟道废气治理典型工艺流程, 《炼焦化学工业废气治理工程技术规范 (HJ 1280-2023)》列举了五种典型工艺流程: “钠基干法脱硫+除尘+脱硝”、“钙基颗粒床干法脱硫+除尘+脱硝”、“钠基半干法脱硫+除尘+脱硝”、“钙基半干法脱硫+除尘+脱硝”、“活性炭(焦)法脱硫脱硝除尘一体化工艺流程”。本文提出“钙基超细粉干法脱硫+除尘+脱硝”工艺流程, 并与“钠基干法脱硫+除尘+脱硝”、“钙基颗粒床干法脱硫+除尘+脱硝”、“钙基半干法脱硫+除尘+脱硝”三种工艺流程进行脱硫工艺对比。采用流态化高活性氢氧化钙粉的钙基超细粉干法脱硫, 脱硫烟气温度适用范围广, 脱硫烟气二氧化硫浓度适用范围广, 脱硫灰可循环利用、降低钙硫比从而降低运行成本。脱硫副产物处理相对容易, 具有较大的市场应用前景。

2 脱硫工艺原理

2.1 钠基干法脱硫

碳酸氢钠(小苏打, NaHCO_3)作为烟气脱硫的

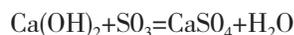
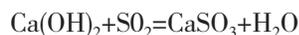
吸附剂和反应剂, 通过化学吸附脱除烟气中的酸性污染物, 同时还可以通过物理吸附脱除一些有机和无机微量物质, 此工艺将 NaHCO_3 细粉直接喷入温度高于 140°C 烟气中, 反应方程式如下^[1]:



2.2 钙基颗粒床干法脱硫

钙基颗粒床干法脱硫技术工艺原理为烟气中的 SO_2 与脱硫剂中的氢氧化钙、氧化镁等活性组分发生反应生成相应的固体盐, 从而达到脱硫的目的。

脱硫过程主要化学反应如下^[2]:

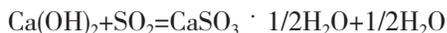


钙基粒状脱硫剂技术指标为灰色或褐色颗粒状, $\Phi 6-8\text{mm}$, 比表面积 $\geq 35\text{m}^2/\text{g}$, 硫容 (SO_2) $\geq 20\%$ 。

2.3 CFB 钙基半干法脱硫

烟气从吸收塔底部进入通过文丘里管的加速, 进入循环流化床床体, 气固两相由于气流的作用, 产生

激烈的湍动与混合，充分接触，在上升的过程中，不断形成絮状物向下返回，而絮状物在激烈湍动中又不断解体重新被气流提升。在文丘里的出口扩管段设有喷水装置，喷入的雾化水用以降低脱硫反应器内的烟温，使烟温降至高于烟气露点 20℃左右。



2.4 钙基超细粉干法脱硫^[3]

钙基超细粉干法脱硫采用高活性氢氧化钙(Ca(OH)₂)脱硫剂，白色粉状，Ca(OH)₂含量≥85%，含水量≤2%，粒度分布(325目过筛率)≥85%，比表面积≥40m²/g。

脱硫反应原理： $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2 = \text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$

根据烟气 SO₂ 含量将高活性氢氧化钙脱硫剂喷入除尘器前脱硫塔中，使其充分与烟气混合，在混合过程中可以脱除部分 SO₂，随烟气进入布袋除尘器的脱硫剂吸附在除尘器布袋上与烟尾气中 SO₂ 再次发生反应，即可达到高效脱除 SO₂ 的作用，满足排放要求。

3 钙基超细粉干法脱硫工艺流程

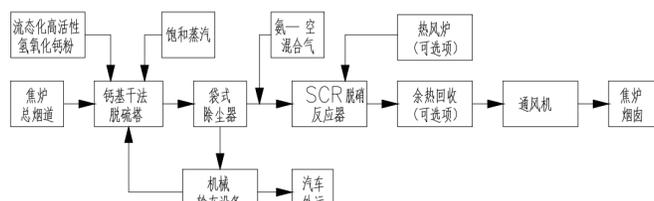


图1 “钙基超细粉干法脱硫+除尘+脱硝”工艺流程

本工艺流程的创新点为：

3.1 设置脱硫塔

脱硫塔借鉴 CFB 钙基半干法脱硫塔，通过脱硫塔下部的文丘里管的加速，产生激烈的湍动与混合，充分接触，SO₂ 充分反应。

3.2 设置蒸汽喷口

随着烟气相对湿度的升高，烟气穿透时间增加，烟气脱硫效率增大，因此，在工业应用中，在保证脱硫塔内部不出现黏壁现象时，为增加脱硫剂的脱硫效率，可以提高脱硫塔内的相对湿度，钙基脱硫剂在相对湿度为 45% 时脱硫效率较优。^[4] 设置蒸汽喷口可提高脱硫塔内烟气的相对湿度进而提高脱硫效率，节约脱硫剂用量。

3.3 脱硫灰循环

脱硫剂经脱硫塔及布袋除尘器后即排放，此时钙硫比为 2~3^[5]，将脱硫灰循环利用，可节约脱硫剂用量。

4 与“钠基干法脱硫+除尘+脱硝”工艺流程的经济效益对比

鞍山盛盟煤气化有限公司现有 2 台 2×5.5m 侧装捣固焦炉，2019 年由辽宁冶金设计研究院进行脱硫脱

硝改造，改造后的工艺路线为：原烟气余热锅炉+钠基干法脱硫+布袋除尘+SCR 脱硝+净烟气余热锅炉；2024 年增设钙基超细粉干法脱硫，钙基超细粉干法脱硫替代钠基干法脱硫运行。

系统原始参数为：风量 330000Nm³/h，SO₂ 浓度 573mg/ Nm³，NO_x 浓度 1184mg/ Nm³，粉尘浓度 20mg/ Nm³，年运行时间 8760h；排放指标为：SO₂ 浓度 30mg/ Nm³，NO_x 浓度 150mg/ Nm³，粉尘浓度 10mg/ Nm³。

4.1 运行成本

钠基干法脱硫原料目前采用进口碳酸氢钠粗粉，进口原料价格约 3800 元/t；钙基超细粉干法脱硫原料采用国产高活性氢氧化钙粉，国产原料价格约 1850 元/t。

表1 脱硫剂消耗量计算

序号	项目	钠基参数	钙基参数
1	脱除的 SO ₂ 小时量 (kg/h)	179	
2	脱硫剂理论小时消耗量 (kg/h)	470	207
3	纯度 (%)	99.5	85.0
4	脱硫剂实际小时消耗量 (kg/h)	473	470
5	钙 / 钠硫比	2.58	2.00
6	脱硫灰产量 (kg/h)	652	650

表2 运行成本对比

序号	消耗指标	单位	数据		单价 (元)		年运行费 (万元)	
			钙基	钠基	钙基	钠基	钙基	钠基
1	电耗	kWh	35	65	0.746	22	42	
2	脱硫剂	kg/h	470	473	1.85	3.8	762	1574
3	脱硫副产物	kg/h	650	652	0.4	0.9	228	514
4	年运行费用						1012	2130

钙基超细粉干法脱硫较钠基干法脱硫理论上每年节约运行成本 1118 万元。

4.2 脱硫副产物处理

钠基干法脱硫副产物主要为 Na₂SO₄，易溶于水，不能填埋，目前以堆积为主，提纯处理成本高；钙基超细粉干法脱硫副产物主要为 CaSO₃、CaSO₄，可送水泥厂再利用，也可填埋处理，处理成本低。

4.3 系统初投资

钠基干法脱硫将脱硫剂直接喷入管道，脱硫灰不循环利用；钙基超细粉干法脱硫将脱硫剂喷入脱硫塔，脱硫灰循环利用；钙基超细粉干法脱硫较钠基干法脱硫增加脱硫塔、脱硫灰循环装置，初投资约增加 300 万元。

4.3 实际运行情况分析

2024 年投产运行后，系统未设置脱硫塔，利用现

有烟气管道；脱硫灰亦未设置循环利用；蒸汽喷射亦未投入；经现场统计，钠基干法脱硫剂消耗量 5t/d，钙基超细粉干法脱硫剂消耗量 6.5t/d，实际钙硫比经计算约为 2.6。钙基超细粉干法脱硫较钠基干法脱硫实际上每年节约成本 371 万元/a。

5 与“钙基颗粒床干法脱硫 + 除尘 + 脱硝”工艺流程的经济效益对比

5.1 运行成本

钙基颗粒床干法脱硫原料采用新鲜粒状脱硫剂，国产原料价格约 3000 元/t；钙基超细粉干法脱硫原料采用流态化高活性氢氧化钙粉，国产原料价格约 1850 元/t。

钙基颗粒床干法脱硫剂（硫容 22%）理论计算量 815kg/h，每小时运行费用 2445 元/h；钙基超细粉干法脱硫剂（钙硫比 2.6、纯度 85%）理论计算量 612kg/h，每小时运行费用 1132 元/h；钙基超细粉干法脱硫较钠基干法脱硫节约 1313 元/h，每年节约运行费用 1150 万元。

5.2 二氧化硫的适用范围

钙基颗粒床干法脱硫烟气二氧化硫浓度 $\leq 300\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时，运行稳定； $300\text{mg}/\text{Nm}^3 <$ 烟气二氧化硫浓度 $\leq 500\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，脱硫剂频繁外排；烟气二氧化硫浓度 $> 500\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，处理达标较困难。钙基超细粉干法脱硫烟气二氧化硫浓度适用范围 $\leq 1000\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

由于焦炉炉龄增大、串漏严重，系统入口二氧化硫浓度显著增加，钙基超细粉干法脱硫适用性较高。

5.3 系统初投资

钙基颗粒床干法脱硫利用脱硫塔兼做除尘器，系统投资省；如焦炉烟道废气粉尘浓度 $\geq 30\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，粉尘排放浓度不能保证达到 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，存在粉尘超标风险。

钙基超细粉干法脱硫较钙基颗粒床干法脱硫增加袋式除尘器，粉尘达标排放有保证；初投资约增加 440 万元。

6 与“钙基半干法脱硫 + 除尘 + 脱硝”工艺流程的经济效益对比

6.1 初投资

钙基半干法脱硫较钙基超细粉干法脱硫增加气换热器，系统烟气流程复杂，系统阻力增加约 1500Pa，初投资约增加 450 万元。

6.2 系统温降及能耗

钙基半干法脱硫气换热器高温端产生 30℃ 温差，需要采用热风炉将烟气补热，加热量 396 万 kCal/h，消耗焦炉煤气 16.72GJ/h，焦炉煤气价格约 58 元/GJ，焦炉煤气费用 969.76 元/h，每年焦炉煤气费用增

加 772 万元。

系统阻力约增加 1500Pa，电机功率约增加 260kW，电费价格 0.746 元/kW·h，每年电费增加 170 万元。

钙基半干法脱硫原料普通氢氧化钙粉（钙硫比 1.8、纯度 90%）理论计算量 358kg/h，单价约 600 元/t，费用 215 元/h；钙基超细粉干法脱硫原料（钙硫比 2.6、纯度 85%）理论计算量 612kg/h，费用 1132 元/h；钙基半干法脱硫较钙基超细粉干法脱硫原料费用减少 917 元/h，每年减少脱硫剂原料费用 803 万元。

钙基超细粉干法脱硫较钙基半干法脱硫节约每年节约运行费用 139 万元。

7 总结

“钙基超细粉干法脱硫 + 除尘 + 脱硝”工艺流程，较之“钠基干法脱硫 + 除尘 + 脱硝”，运行成本低、脱硫副产物处理容易；较之“钙基颗粒床干法脱硫 + 除尘 + 脱硝”，运行成本低、二氧化硫的适用范围较广；较之“钙基半干法脱硫 + 除尘 + 脱硝”工艺流程，初投资小、运行成本低。

采用流态化高活性氢氧化钙粉的钙基超细粉干法脱硫，脱硫烟气温度适用范围广：50~350℃；脱硫烟气二氧化硫浓度适用范围广： $\leq 1000\text{mg}/\text{Nm}^3$ ；脱硫灰循环利用、降低钙硫比，钙硫比最低可小于 2.0，从而降低运行成本。焦炉烟道废气无需换热直接进入脱硫塔脱硫、袋式除尘器除尘，系统温降低，脱硫除尘后的烟气再进行下一步脱硝，有较大的市场应用前景。

参考文献：

- [1] YB/T4863-2020. 焦炉烟气 SDS 干法脱硫联合 SCR 脱硝技术规范 [S]. 北京：中国工业和信息化部，2020.
- [2] 邓兴智，钟伟强，刘秀珍，邱兴盛. 钙基移动床干法脱硫除尘一体化技术探讨 [J]. 陶瓷，2021(09):19-25.
- [3] 同兴环保科技股份有限公司，安徽方信立华环保科技有限公司. 一种焦化烟气治理钙基干法脱硫系统：中国，202222537435.2[P].2023-01-31
- [4] 吕娟，黄利华，滕德亮，等. 相对湿度对钙基脱硫剂干法烟气脱硫效率的影响 [J]. 环境工程学报，2020,14(06):1563-1569
- [5] 上海轩鼎冶金科技集团有限公司. 一种垃圾焚烧烟气钙基纯干法脱硫系统：中国，202223327603.1 [P].2023-05-30

作者简介：

梁晓冬（1983.11—），男，汉族，江苏徐州人，大学本科，工学学士，高级工程师，主要研究方向：大气污染治理。