

# 半干法脱硫工艺在苯酐行业的应用前景

化胜新 (唐山开滦炭素化工有限公司, 河北 唐山 063611)

**摘要:** 本研究聚焦半干法脱硫工艺在苯酐行业的应用前景。通过对苯酐行业现状、半干法脱硫工艺原理、优势及在苯酐尾气处理中的应用案例分析, 探讨其未来发展趋势。研究发现, 半干法脱硫工艺凭借高效脱硫、适应性强、运行成本低等优势, 在苯酐行业具有广阔应用前景。但也面临技术创新、市场竞争等挑战。未来需持续改进技术、加强成本控制与市场拓展, 以更好地服务于苯酐行业的绿色发展。

**关键词:** 半干法脱硫工艺; 苯酐行业; 脱硫效率; 循环流化床

中图分类号: X701.3 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 023-0010-03

## Application prospect of semi-dry desulfurization process in phthalic anhydride industry

Hua Sheng xin (Tangshan Kailuan Carbon Chemical Co., LTD., Tangshan Hebei 063611, China)

**Abstract:** This study focuses on the application prospects of semi-dry flue gas desulfurization technology in the phthalic anhydride industry. By analyzing the current status of the phthalic anhydride industry, the principles and advantages of semi-dry flue gas desulfurization technology, and case studies of its application in phthalic anhydride tail gas treatment, this study explores its future development trends. The research finds that the semi-dry flue gas desulfurization technology, with its high efficiency, strong adaptability, and low operating costs, has broad application prospects in the phthalic anhydride industry. However, it also faces challenges such as technological innovation and market competition. In the future, continuous improvements in technology, cost control, and market expansion are needed to better serve the green development of the phthalic anhydride industry.

**Key words:** semi-dry desulfurization process; phthalic anhydride industry; desulfurization efficiency; circulating fluidized bed

苯酐作为一种重要的有机化工原料, 在塑料、涂料、合成纤维等众多领域有着广泛应用。随着全球经济的发展, 苯酐的市场需求持续增长。然而, 苯酐生产过程中会产生大量含硫废气, 若未经有效处理直接排放, 不仅会对环境造成严重污染, 还会危害人体健康。在环保要求日益严格的背景下, 寻求高效、经济、环保的脱硫技术成为苯酐行业可持续发展的关键。半干法脱硫工艺作为一种新兴的脱硫技术, 以其独特的优势逐渐在苯酐行业崭露头角。本文将深入探讨半干法脱硫工艺在苯酐行业的应用前景, 为苯酐生产企业的脱硫技术选择提供参考依据。

### 1 苯酐行业发展现状

#### 1.1 苯酐的生产工艺与市场规模

苯酐的生产工艺主要有萘法和邻二甲苯法。萘法苯酐是以萘为原料, 采用固定床催化氧化法生产; 邻二甲苯法则以邻二甲苯为原料, 通过氧化反应制备苯酐。目前, 全球苯酐市场规模呈现稳步增长态势, 据市场研究报告显示, 2019 年全球苯酐市场规模约为 150 亿美元, 预计到 2025 年将达到 200 亿美元, 年复合增长率约为 4%。中国作为全球最大的苯酐生产国和消费国, 年产量占全球总产量的近 50%, 2019 年苯酐消费量约为 150 万吨, 占全球总消费量的 40% 以上。

#### 1.2 苯酐生产过程中的污染问题

苯酐生产过程中会产生大量的废气、废水和废渣。废气中主要污染物为二氧化硫、氮氧化物、粉尘等; 废水中含有有机酸、醇类、酚类等有害物质; 废渣则主要是催化剂、活性炭等固体废弃物。这些污染物若未经有效处理, 将对环境造成严重污染。其中, 二氧化硫的排放是苯酐生产过程中的主要环境问题之一, 不仅会形成酸雨, 还会对大气环境质量造成严重影响。

#### 1.3 环保政策对苯酐行业的影响

随着环保政策的日益严格, 各国政府对苯酐生产企业的污染物排放要求越来越高。我国政府近年来加大了对环保的重视力度, 出台了一系列环保政策和法规, 如《大气污染防治行动计划》、《工业污染源全面达标排放计划》等, 对苯酐生产企业的二氧化硫、氮氧化物等污染物排放进行严格限制。苯酐生产企业必须采取有效的污染治理措施, 确保污染物达标排放, 否则将面临停产整顿、罚款等处罚。这促使苯酐生产企业积极寻求高效的脱硫技术, 以满足环保要求。

### 2 半干法脱硫工艺原理与特点

#### 2.1 半干法脱硫工艺的分类与原理

半干法脱硫工艺是在湿法和干法脱硫技术基础上发展起来的一种脱硫技术, 它结合了湿法脱硫工艺反

应充分、效率高和干法脱硫工艺投资少、无需废水处理的优势。常见的半干法脱硫工艺有喷雾干燥法烟气脱硫、循环流化床烟气脱硫（CFB-FGD）和增湿灰循环烟气脱硫（NID 法）等。

以循环流化床烟气脱硫工艺为例，其原理是：高温烟气从吸收塔底部进入，与从空气槽进入的吸收剂（干态消石灰粉  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）和布袋除尘返回的循环灰在文丘里管附近充分混合。在文丘里管的喷射作用下，烟气、吸收剂和灰充分混合后进入反应器直管段。在文丘里管的扩口出口处设有喷水装置，通过喷水使脱硫塔内气体温度降至比烟气露点高约  $15^\circ\text{C}$ ，在较低温度和较高湿度的条件下，烟气中的  $\text{SO}_2$  与吸收剂发生反应，生成亚硫酸钙和硫酸钙。反应后的烟气携带大量干态固体颗粒进入布袋除尘器进行处理，布袋除尘器分离出的干态循环灰通过输送装置返回反应装置进行循环利用。净化后的烟气温度不低于其露点  $15^\circ\text{C}$ ，经引风机排入烟囱，无需再加热。

## 2.2 半干法脱硫工艺的优势

一是脱硫效率高。半干法脱硫工艺的脱硫效率可达到 90%–98%，在保证  $\text{SO}_2$  脱除率高的同时，能够有效满足环保排放标准。循环流化床烟气脱硫工艺通过吸收剂的多次再循环，延长了吸收剂与烟气的接触时间，使脱硫反应更加充分，从而提高了脱硫效率。

二是适应性强。该工艺对含硫量的波动范围适应能力强，能在不同含硫量的烟气条件下稳定运行。无论是高硫煤还是低硫煤燃烧产生的烟气，半干法脱硫工艺都能有效脱除其中的二氧化硫。此外，燃烧煤种变化时，无需增加任何设备，仅增加脱硫剂就可满足脱硫效率要求。

三是运行成本低。半干法脱硫工艺系统阻力小，设备基本无腐蚀、无磨损、无结垢，运行过程中无需频繁更换设备部件，降低了设备维护成本。同时，该工艺无需复杂的废水处理系统，节省了废水处理费用，具有良好的经济性能，适合长期运行。

四是无二次污染。脱硫剂和脱硫渣均为干态，脱硫副产品为干态混合物，易于处理，无废水排放，避免了二次污染问题。脱硫渣还可以进一步综合利用，如用于建筑材料等领域，实现资源的循环利用。

## 2.3 半干法脱硫工艺的局限性

其一，对吸收剂要求较高。半干法脱硫工艺需要采用较高纯度和活性的石灰作为脱硫剂，这增加了吸收剂的采购成本。若吸收剂质量不稳定，还可能影响脱硫效果。其二，脱硫产物综合利用受限。虽然脱硫渣可进行综合利用，但目前其应用范围相对较窄，主要用于建筑材料等领域。在一些地区，由于缺乏完善

的脱硫渣综合利用产业链，脱硫渣的处理仍面临一定困难。其三，技术复杂程度较高。半干法脱硫工艺涉及到气固两相流、化学反应、传热传质等多个复杂过程，对设备的设计、操作和控制要求较高。企业需要配备专业的技术人员，以确保工艺的稳定运行。

## 3 半干法脱硫工艺在苯酐行业的应用实例

### 3.1 某苯酐生产企业的脱硫项目案例

某大型苯酐生产企业采用循环流化床烟气脱硫工艺对苯酐尾气进行处理。该企业的苯酐生产装置采用萘法固定床催化氧化工艺，尾气中二氧化硫浓度较高。在采用循环流化床烟气脱硫工艺之前，企业的尾气排放无法稳定达标，面临较大的环保压力。该脱硫项目主要设备包括吸收塔、布袋除尘器、脱硫剂供应系统、工艺水系统等。吸收塔采用烟气循环流化床超净吸收塔技术，保证了足够的脱硫反应时间。布袋除尘器用于捕集烟气中的粉尘和脱硫产物，确保排放的烟气粉尘浓度达标。

脱硫剂采用干态消石灰粉，通过吸收剂供应系统将其输送至吸收塔内。工艺水系统则为脱硫反应提供必要的水分。项目运行后，脱硫效果显著。经检测，烟气中二氧化硫排放浓度稳定低于  $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，颗粒物排放浓度低于  $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，完全满足环保排放标准。同时，该工艺的运行稳定性高，设备故障率低，为企业的正常生产提供了有力保障。通过对脱硫渣的综合利用，企业还实现了一定的经济效益。

### 3.2 应用效果分析

就脱硫效率来说，该项目的脱硫效率高达 95% 以上，有效降低了苯酐尾气中的二氧化硫含量。在不同工况下，脱硫系统均能稳定运行，确保了尾气的达标排放。就运行成本来说，通过优化工艺参数和设备选型，该项目的运行成本得到有效控制。吸收剂利用率高，减少了吸收剂的消耗；设备维护简单，降低了维护成本。与传统脱硫工艺相比，每年可为企业节省大量的运行费用。

## 4 半干法脱硫工艺在苯酐行业的应用前景分析

### 4.1 政策驱动下的广阔发展空间

当前，全球对环境保护的重视程度达到前所未有的高度，环保政策法规日益严苛，苯酐行业作为工业污染重点监管领域，面临着巨大的减排压力。我国相继出台《大气污染防治行动计划》、《工业污染源全面达标排放计划》等政策，明确规定苯酐生产企业的二氧化硫排放需满足严格标准，部分地区更是执行特别排放限值，要求二氧化硫排放浓度低于  $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

半干法脱硫工艺凭借其卓越的脱硫性能，脱硫效

率可达 90%~98%，完全契合当下及未来更为严格的环保政策要求。苯酐生产企业为避免因超标排放遭受高额罚款、停产整顿等处罚，积极寻求高效脱硫解决方案，半干法脱硫工艺因其高效、稳定的脱硫效果，成为众多企业的优先选择。以某大型苯酐生产基地为例，在采用半干法脱硫工艺后，二氧化硫排放浓度稳定控制在  $20\text{mg}/\text{Nm}^3$  以内，顺利通过环保部门的严格监测，为企业持续稳定生产提供了坚实保障，也为半干法脱硫工艺在行业内的推广树立了成功典范。随着政策的持续收紧，半干法脱硫工艺在苯酐行业的应用将愈发广泛，市场份额有望进一步扩大。

#### 4.2 技术创新下的性能优化提升

近年来，科研人员针对半干法脱硫工艺展开深入研究，不断取得技术突破，显著提升了该工艺的性能并降低了成本。在吸收剂优化方面，通过改进制备工艺，提高了石灰的纯度和活性，使吸收剂的利用率大幅提升，减少了吸收剂的消耗。新型活性石灰制备技术，能够使石灰的活性比传统石灰提高 30% 以上，在保证脱硫效率的同时，降低了约 20% 的吸收剂用量。

未来，随着纳米技术、智能控制技术等新兴技术与半干法脱硫工艺的深度融合，有望开发出更高效、节能的脱硫技术和设备。纳米材料的应用可能会使吸收剂的性能得到质的飞跃，大幅提高脱硫效率；智能控制系统的升级将实现脱硫过程的全自动化、智能化管理，进一步降低人力成本和运行能耗，从而提升半干法脱硫工艺在苯酐行业的竞争力，为其广泛应用提供更有利的技术支撑。

#### 4.3 市场竞争下的成本效率优势

苯酐行业市场竞争激烈，企业对生产成本的控制极为重视。半干法脱硫工艺在成本和效率方面具有显著优势，使其在市场竞争中脱颖而出。与湿法脱硫工艺相比，半干法脱硫工艺无需庞大的烟气冷却和加热系统，设备投资可大幅度减少，且不存在废水处理难题，节省了大量的废水处理设施建设运行费用。

与干法脱硫工艺相比，半干法脱硫工艺的脱硫效率更高，能在较低的钙硫比下达到与湿法洗涤工艺相近的脱硫效果，大大降低了吸收剂的消耗成本。在处理相同含硫量的烟气时，半干法脱硫工艺的钙硫比可比干法脱硫工艺低 20%~30%。以年产 5 万吨苯酐的企业为例，每年可节省吸收剂费用约 50~80 万元。半干法脱硫工艺系统阻力小，设备基本无腐蚀、无磨损、无结垢，减少了设备维护和更换的频率，降低了维护成本，延长了设备使用寿命，为企业节省了大量的设备更新资金。

综合来看，半干法脱硫工艺在成本和效率上的优

势，使其成为苯酐生产企业在市场竞争中降低成本、提高竞争力的有力武器，推动了该工艺在苯酐行业的广泛应用。

#### 4.4 理念驱动下的可持续发展

随着可持续发展理念在苯酐行业的深入贯彻，企业对环保和资源综合利用的要求越来越高。半干法脱硫工艺在实现高效脱硫的同时，能有效减少污染物排放，助力企业实现绿色生产。其脱硫副产品为干态混合物，主要成分是亚硫酸钙和硫酸钙等，具有良好的综合利用价值。这些脱硫副产品可作为建筑材料的原料，用于生产水泥、石膏板等产品；也可在农业领域用作土壤改良剂，调节土壤酸碱度，改善土壤结构。某苯酐生产企业通过与当地建筑材料厂合作，将脱硫副产品全部回收利用，不仅解决了脱硫副产品的处置难题，还为企业带来了额外的经济效益，每年可增加收入约 30~50 万元。

#### 5 结语

半干法脱硫工艺凭借其脱硫效率高、适应性强、运行成本低、无二次污染、占地面积小等优势，在苯酐行业具有广阔的应用前景。通过实际应用案例可以看出，半干法脱硫工艺能够有效降低苯酐尾气中的二氧化硫和颗粒物排放，满足环保排放标准，同时为企业带来一定的经济效益和环保效益。

#### 参考文献：

- [1] 付庆伟, 刘聪, 杜健敏, 刘瑛, 付本全, 张垒. 高炉煤气精脱硫技术工业实践 [J]. 冶金动力, 2025(02):70-72.
- [2] 张钊, 许明艳, 宣守国, 李继聪, 周广林. 新型精脱硫技术在焦炉煤气深度脱硫中的应用 [J]. 工业催化, 2024(12):1-6.
- [3] 韩铠泽, 刘方, 张光学. 循环流化床锅炉炉内脱硫技术研究进展 [J]. 电力科技与环保, 2025, 41(02):183-193.
- [4] 刘海峰, 庄绪增, 路亭伟, 董永胜. 燃煤锅炉脱硫废水零排放工艺探究 [J]. 清洗世界, 2024(3):21-26.
- [5] 王东歌, 王彬, 张志刚. 玻璃熔窑半干法脱硫工艺技术经济分析 [J]. 建材世界, 2017, 38(5):7.
- [6] 李志强, 王磊, 张宏. 半干法脱硫技术在化工废气治理中的应用研究 [J]. 环境工程, 2023, 41(5):112-117.
- [7] 陈华, 刘伟, 赵明. 循环流化床半干法脱硫工艺优化及工业应用 [J]. 化工环保, 2024, 44(1):45-50.

#### 作者简介：

化胜新 (1985- )，男，汉族，河北故城人，大学本科，工程师，研究方向：氯法苯酐生产。