

# 脱硫脱硝一体化药剂制备及工业应用性能分析

陈怀亮 孔举 李哲

山东荣信集团有限公司 山东省济宁市邹城市 273500

**摘要：**脱硫脱硝一体化技术是当前工业烟气治理领域的核心方向，其关键在于高性能药剂与催化剂的研发制备。本文系统阐述了一体化药剂的制备工艺原理，分析了不同技术路线下药剂的催化活性与工业适用性，并对其在电力、钢铁、水泥等行业的应用性能进行了综合评估。研究表明，新型复合催化剂与钙基干法药剂在协同脱除效率、运行成本及副产物回收方面均展现出显著优势，符合我国节能环保与可持续发展的战略需求。

**关键词：**脱硫脱硝；一体化药剂；催化剂制备；工业应用；钙基干法

## 引言

工业烟气中二氧化硫与氮氧化物的协同控制是大气污染治理的关键环节，传统技术多采用脱硫与脱硝分步处理的方式，存在设备投资大、占地面积广、运行成本高等突出问题，难以适应日益严格的超低排放标准。开发兼具脱硫脱硝双重功能的一体化药剂，已成为该领域的研究热点与工程需求。近年来，钙基干法药剂、负载型多金属催化剂等新型材料相继涌现，在协同脱除效率、副产物资源化及系统经济性方面展现出明显优势。

## 一、脱硫脱硝一体化药剂的制备工艺与技术原理

### 1.1 湿法体系药剂的制备技术路线

湿法脱硫脱硝一体化药剂以石灰石—石膏法与选择性催化还原技术的组合为代表，其核心在于吸收剂与催化剂的协同配伍。药剂制备过程中，需将碳酸钙研磨至特定粒径后配制成浆液，同时负载钒钛系催化剂以实现脱硝功能。整个制备流程要求严格控制浆液浓度与催化剂分散均匀性，确保气液接触面积最大化。该路线技术成熟度高，脱硫效率可达较高水平，但工程投资与运行费用偏高，且存在二次污染风险，药剂制备环节的精细化控制直接决定了系统整体运行稳定性与经济性表现。

### 1.2 干法体系催化剂的合成方法

干法脱硫脱硝一体化药剂的制备以分子筛负载型催化剂为技术前沿，其典型工艺采用溶胶—凝胶法结合微波晶化技术。制备时首先将氧化铜、二氧化钛、氧

化钒等活性组分经超声除杂后溶于去离子水，加入正硅酸四乙酯与异丙醇铝在油浴条件下搅拌成凝胶，再经微波反应器在氮气氛围下晶化，最后通过浸渍法负载多金属活性组分并煅烧成型。该方法制备的催化剂具有孔径均匀、活性位点分散度高的特点，在中低温条件下即可展现出优异的协同催化脱硫脱硝性能。

### 1.3 钙基固定床干法药剂的制备特点

钙基固定床干法脱硫脱硝药剂采用氢氧化钙为主要脱硫活性组分，以专用无氨脱硝剂为脱硝活性组分，两者通过单元化固定床结构实现一体化协同处理。药剂制备过程相对简洁，脱硫剂通过氧化—吸收反应将二氧化硫转化为硫酸钙，脱硝剂在催化剂作用下将氮氧化物还原为氮气。该药剂体系最大的优势在于不使用氨水，从根本上消除了氨逃逸问题，同时副产物硫酸钙与硝酸钙均为固废，可回收利用，制备与运维成本显著低于传统湿法路线。

## 二、一体化药剂的工业应用性能与技术比较

### 2.1 协同脱除效率与温度适应性分析

一体化药剂的核心性能指标在于二氧化硫与氮氧化物的协同脱除效率，湿法石灰石—石膏法配合 SCR 脱硝工艺，脱硫效率较高而脱硝效率受催化剂活性温度窗口限制，需在特定温度范围内运行。干法活性炭吸附法可在较低温度下实现较高的脱硝率，且不产生二次污染。钙基固定床干法药剂的突出优势在于对烟气温度波动不敏感，脱硫可达近完全去除，脱硝对温度要求远低于 SCR 工艺，整体适应性强，尤其适合工况条件复杂的中小型工业炉窑烟气治理场景。

### 2.2 运行经济性与副产物回收价值

从全生命周期成本角度审视，一体化药剂的运行经济性是决定其工业推广程度的关键因素。湿法工艺设备投资大、能耗高、需持续消耗石灰石并产生大量石膏废渣。干法活性炭吸附法虽无二次污染，但吸附剂成本较高且需定期补充。钙基干法药剂在经济性方面表现突出，其一次性投资较低、系统阻力小、电耗低，且副产物硫酸钙与硝酸钙均可作为固废回收，部分场景下可转化为建筑材料或化工原料，实现了从末端治理到资源循环的转变，经济效益与环境效益兼得。

### 2.3 设备抗腐蚀性 with 系统维护特性

药剂的化学特性直接影响脱硫脱硝设备的腐蚀程度与维护频率，湿法体系中酸性浆液对金属设备腐蚀严重，需采用耐腐蚀合金或内衬防腐材料，维护成本高

昂。SCR 脱硝催化剂在高温高尘环境下易中毒失活，使用寿命有限。相比之下，钙基固定床干法药剂在运行中不涉及液态酸性介质，设备腐蚀风险极低，系统几乎免维护，无需增设专职操作岗位。干法分子筛催化剂虽需定期再生，但其微波晶化制备工艺赋予了材料更高的热稳定性与抗中毒能力，延长了运行周期。

## 2.4 多行业适用性与工艺灵活性

一体化药剂的工业应用覆盖电力、钢铁、水泥、化工、焦化、硅材料等多个高排放行业，火电厂烟气量大且工况稳定，适合采用湿法加 SCR 的组合工艺。钢铁与水泥行业烟气成分复杂、温度波动大，钙基干法药剂因其宽温域适应性与单元化灵活设计更具优势。焦化与硅材料行业对微粉品质要求严格，干法工艺布置在除尘器后可避免对产品质量的影响。不同药剂体系针对不同行业特征展现出差异化的适用性，工艺选型需综合考虑烟气条件、排放标准与经济承受能力。

## 三、一体化药剂技术的发展趋势与展望

### 3.1 新型复合催化剂的研发方向

未来一体化药剂的研发将聚焦于多功能复合催化剂的设计与制备，以氧化铜负载分子筛为基础，通过引入钛、钒等过渡金属活性组分，结合微波辅助晶化与模板剂导向合成技术，可制备出在更宽温度范围内保持高活性的催化剂。同时，将活性炭与金属氧化物复合，可克服单一活性炭使用温度偏低与单一金属氧化物活性温度偏高的缺陷，实现低温高效协同脱除。新型药剂的研发应注重原料来源的广泛性与制备成本的可控性，为大规模工业推广奠定基础。

### 3.2 政策驱动下的技术升级路径

我国环保政策持续收紧，工业废气排放标准日趋严格，这为一体化药剂技术的升级提供了强劲的政策驱动力。国家已将固定床干法烟气处理装备列入鼓励发展的重大环保技术装备目录，财政补贴与税收优惠政策有效降低了企业环保改造成本。未来技术升级将沿着高效化、低成本化、资源化三个方向推进，重点突破高浓度烟气处理、低氮氧化物超净排放与设备长效抗腐蚀等技术瓶颈，推动脱硫脱硝一体化技术从达标排放迈向近零排放。

### 3.3 资源循环与可持续发展导向

一体化药剂技术的终极目标不仅在于污染物的末端去除，更在于实现副产物的高值化利用与资源闭环。钙基干法工艺产生的硫酸钙与硝酸钙固废可回收制建

材或化肥，活性炭吸附法可回收高纯硫磺与浓硫酸，电子束法可生成硫酸铵与硝酸铵等化工产品。未来应进一步强化药剂制备与副产物回收的产业链衔接，构建从烟气治理到资源再生的完整价值链条，使脱硫脱硝一体化技术真正成为工业绿色转型与循环经济的重要支撑。

### 结束语

从湿法石灰石—石膏配合 SCR，到干法分子筛负载催化剂，再到钙基固定床无氨脱硝药剂，技术路线日益多元，性能持续提升。新型复合催化剂在制备工艺上实现了活性组分的精准负载与微观结构的可控调控，在工业应用中展现出高效协同、经济适用、副产物可回收等综合优势。在政策引导与市场需求的驱动下，一体化药剂技术将朝着更高效、更经济、更绿色的方向持续演进，为我国工业废气超低排放与生态文明建设提供坚实的技术保障。

### 参考文献

- [1] 李健. 钙基干法脱硫脱硝一体化技术研究进展[J]. 化工学报, 2023, 74(5): 18-20.
- [2] 陈丽萍. 负载型多金属催化剂协同脱除 SO<sub>2</sub> 与 NO<sub>x</sub>性能研究[J]. 环境科学学报, 2024, 44(3): 56-58.
- [3] 周建国. 工业烟气脱硫脱硝一体化药剂制备及应用性能分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(8): 35-37.