

《水泥窑烟气复合脱硫工程技术规范》 团体标准编制说明

一、工作简况

（一）任务来源

《水泥窑烟气复合脱硫工程技术规范》团体标准项目是由中国水泥协会于2026年2月12日下达的《关于下达2026年第一批中国水泥协会团体标准制定计划的通知》(中水协发(2026)13号)标准制定计划,计划编号为2026-CCAS-002。本标准项目由中国水泥协会提出并归口,由广东万引科技股份有限公司、华南理工大学、华润水泥技术研发(广西)有限公司等单位起草。

目前,当前我国新型干法水泥烧成技术在推动行业高效生产的同时,会产生粉尘、SO₂和NO_x等污染物,其危害性不仅体现在其自身的刺激性,还会通过在大气中的扩散、转化,对人体健康、生态环境、建筑与工业设施造成多维度连锁损害。因此,本标准制定的初衷是提高水泥窑内烟气脱硫速率与效率,实现高效、快速、低成本的脱硫固硫目标。

当前,我国水泥行业作为大气污染排放的重点行业之一,SO₂排放总量居高不下,减排工作迫在眉睫。随着环保政策日益严格,国家及地方对水泥工业SO₂排放限值不断收紧,超低排放量(SO₂≤35mg/Nm³)已成为行业发展的硬性要求。可部分水泥生产线因使用劣质原燃材料、矿产资源品位下降等原因,SO₂排放量波动大,现有的脱硫技术难以实现稳定且达标的排放量。现阶段,水泥行业脱硫技术的通病在于照搬其他行业技术、适配性不足,单一钙基脱硫剂在水泥窑特殊烟气环境下脱硫效率有限,且脱硫产物热稳定性差,易二次释放SO₂。复合脱硫技术作为我国自主研发的高效脱硫技术,具备高效、快速、低成本的显著优势,已在全国28个省400多条水泥生产线上成功应用,但市场上出现因技术能力不足导致脱硫效果不佳的雷同抄袭产品,严重阻碍了行业绿色化进程。

制定本标准的宗旨在于规范水泥窑烟气复合脱硫工程的技术要求,明确适用条件、性能指标、工艺设计、设备选型、安全环保及运行维护等关键内容,避免劣质装备和不规范施工带来的环保风险,引导行业技术升级和高质量发展。通过科学、实用的标准指导企业规范实施脱硫工程,确保SO₂持续稳定达到排放要求,同时保护企业合法权益,推进我国水泥工业的现代化建设与持续健康发展,践行“绿水青山就是金山银山”的发展理念。

（二）主要工作过程

1. 前期工作

2026年x月x日，项目下达后，按照项目任务书的要求，广东万引科技股份有限公司按任务书要求牵头筹划，迅速成立标准起草工作小组，明确人员分工与总体工作计划，划定各阶段时间节点及工作目标，依据协会标准制修订要求推进工作。工作小组多次召开专题会议，深入研讨标准结构框架、技术内容、参数选取及检测指标等核心事项，形成工作组讨论稿；同时，系统查阅水泥行业脱硫相关标准规范，调研复合脱硫技术的工程应用案例，收集大量运行数据与实践经验，为标准编制奠定坚实技术基础。

2. 启动标准项目，成立标准起草工作组

2026年2月，中国水泥协会组织召开《水泥窑烟气复合脱硫工程技术规范》协会标准项目起草工作组成立暨标准草案研讨会，协会、设计单位、制造单位、质量检验单位、用户单位等领域专家参会。会议宣布标准正式启动，成立以广东万引科技股份有限公司为牵头单位的起草工作组，明确标准制定工作程序、任务分工及各阶段时间节点。与会专家本着科学严谨的态度，对标准草案逐字逐句深入研讨，提出修改意见与增补内容。会后，工作组成员逐条研讨并采纳合理建议，对草案进行修改完善，形成标准征求意见稿。

3. 征求意见阶段

2026年x月，标准起草小组发函向设计院所、检测机构、制造单位、使用单位等行业内进行征求意见。同时，中国水泥协会将征求意见稿在协会网站和期刊上公布，向社会广泛征求意见。标准起草组对收集的意见进行了认真的分析和论证，将各单位回复的意见和建议加以筛选甄别，接受了科学合理的意见和建议，汇总形成征求意见汇总处理表。

4. 标准送审稿

2026年xx月，标准起草工作组根据征求意见情况，对标准征求意见稿进行了修改和完善，形成标准送审稿（初稿），提请审查。

（三）标准起草单位、主要起草人

起草单位：广东万引科技股份有限公司、华南理工大学、华润水泥技术研发（广西）有限公司、中国葛洲坝集团水泥有限公司

本标准主要起草人：本文件主要起草人：张同生、陈新智、陶从喜、余云祥、彭卉

根据任务分工，张同生（华南理工大学）负责标准技术路线制定、关键技术

参数的理论论证与学术指导；陈新智（广东万引科技股份有限公司）负责编制工作总体协调、工作计划制定、前期相关资料收集整理，以及标准征求意见稿的修改完善；陶从喜（华润水泥技术研发（广西）有限公司）负责标准中工艺设计、设备配置及工程应用相关条款的编制，并提供生产线运行数据支撑；余云祥（中国葛洲坝集团水泥有限公司）负责运行维护、系统调试及异常工况处理等条款的编写，并承担各阶段征求意见的汇总处理及送审稿审核；彭卉（华南理工大学）负责标准文本的格式规范、条文表述校核统稿及报批材料整理。

二、国家标准编制原则和确定国家标准主要内容（如技术指标、参数、公式、性能要求、试验方法、检验规则等）的论据（包括试验、统计数据）

（一）标准编制原则

本标准编制过程中遵循以下原则：

（1）本标准是根据 GB/T 1.1-2000《标准化工作导则第 1 部分：标准的结构和编写规则》和 GB/T 20001.10《标准编写规则第 10 部分：产品标准》规定以及结合国外先进的产品技术理念和国内产品技术的基本要求，进行编制的。

（2）本标准以科学发展观为指引，紧扣国家生态环保与水泥行业超低排放发展要求，以《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》《“十四五”节能减排综合工作方案》《关于推进实施水泥行业超低排放的意见》等法律法规、政策规划为依据，以实现经济社会可持续发展为目标，通过标准的制定与实施，促进环境效益、经济效益和社会效益相统一，既有利于保护生活环境、生态环境和人体健康，也助力构建完整协调的环境保护标准体系，推动水泥工业绿色低碳转型。

（3）本标准重点规定了水泥窑烟气复合脱硫工程技术的适用条件、性能指标、工程要求、工艺设计要求、设备选型与材料选型要求、安全环保要求、使用与维护要求。

（4）本标准规定的水泥窑烟气复合脱硫工程技术兼顾环保效益与经济可行性，在保障脱硫效率和排放达标前提下，充分考虑企业投资成本、运行成本控制需求，推荐低成本、高效率、低能耗的技术方案和设备选型，平衡环保要求与企业的可持续发展。

（5）本标准制定过程和技术内容坚持公开、公平、公正原则，以科学研究成果和实践经验为坚实依据，内容科学合理、切实可行，既与我国经济技术发展水平及相关方承受能力相适应，又可参照采用国外相关标准与技术法规，既有利

于相关法律、法规和规范性文件的落地实施，又能有效促进环境质量改善。

（二）标准主要内容与说明

本标准的主要内容有：范围、规范性引用文件、术语和定义、重要参数、污染物与污染负荷、总体要求、工艺设计、主要工艺设备和材料、安全环保、运行与维护、交货文件。

1. 适用范围说明

本文件规定了新型干法水泥生产用复合脱硫系统技术的适用条件、性能指标、工程要求、工艺设计、设备与材料选型、安全环保要求、使用与维护要求，适用于新型干法水泥生产线复合脱硫系统的设计、制造、安装验收和性能测试。。

2. 规范性引用文件说明

本标准编制过程中，引用了多项现行有效的国家及行业标准，这些标准通过规范性引用成为本文件必不可少的组成部分。引用的标准内容涵盖了脱硫系统装备、总平面与防火设计、电气控制、安全防护、污染物排放、机械电气安全、设备性能测试、工业控制系统、钢结构施工、水泥工厂设计、烟气脱硫工艺设计、连续监测技术、常压容器、水泥机械涂漆防锈与包装、不锈钢材料、绝热工程设计及机械设备安装验收等多个技术领域，主要包括 GB/T 35150.6《新型干法水泥生产成套装备技术要求第 6 部分：脱硫系统》、GB 50187《工业企业总平面设计规范》、GB 4915-2013《水泥工业大气污染物排放标准》、GB/T 3797《电气控制设备》等。在引用顺序上，优先采用国家标准，其次为建材行业标准，再次为其他行业标准。在标准引用顺序上，优先采用国家标准，其次为行业标准，以保障标准的权威性与适用性。

3. 标准内容说明

本标准对复合脱硫系统、脱硫效率、复合脱硫剂与脱硫质量比等核心术语进行明确定义。其他未定义术语可参照《烟气脱硫工艺设计标准》(GB 51284-2018)、《水泥工业术语》(GB/T 41314-2022)等相关标准。

3.1 复合脱硫系统

使用钙基脱硫粉剂与钠基脱硫水剂两种脱硫剂，其中粉剂随生料入窑，水剂在预热器雾化喷入，脱硫产物固化进入熟料的脱硫工艺。

3.2 脱硫效率

指脱硫前后烟气 SO_2 浓度差值与脱硫前烟气中初始 SO_2 浓度的百分比，按公式 (1) 计算：

$$\text{脱硫效率} = (C_1 - C_2) / C_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中：

C_1 ——脱硫前烟气中 SO_2 的折算浓度（按照 O_2 含量 10% 计算）， mg/Nm^3 ；

C_2 ——脱硫后烟气中 SO_2 的折算浓度（按照 O_2 含量 10% 计算）， mg/Nm^3 。

3.3 复合脱硫剂与脱硫质量比

指脱硫剂消耗量与脱除的 SO_2 排放量的质量比。生料磨停机状态下，停用全部脱硫剂 1 小时后，测得脱硫前烟囱排放口烟气中 SO_2 的折算浓度为 C_1 （连续 1 小时数据平均值），烟囱烟气排放总量为 Q_1 ，投用脱硫剂 10 分钟开始，测得脱硫后烟囱排放口烟气中 SO_2 的折算浓度为 C_2 （连续 1 小时数据平均值），烟囱烟气排放总量为 Q_2 ，投用脱硫剂期间消耗粉剂的质量为 m_1 ，消耗水剂的质量为 m_2 ，复合脱硫剂与脱除 SO_2 的粉剂质量比按以下公式（2）、水剂质量比按公式（3）计算：

$$\text{粉剂质量比} = 10^6 \cdot m_1 / (C_1 \cdot Q_1 - C_2 \cdot Q_2) \quad (2)$$

$$\text{水剂质量比} = 10^6 \cdot m_2 / (C_1 \cdot Q_1 - C_2 \cdot Q_2) \quad (3)$$

式中：

m_1 ——消耗粉剂的质量 kg/h ；

m_2 ——消耗水剂的质量 mg ；

C_1 ——脱硫前烟气中 SO_2 浓度， mg/Nm^3 （101325Pa、 0°C ，干基）；

C_2 ——脱硫后烟气中 SO_2 浓度， mg/Nm^3 （101325Pa、 0°C ，干基）；

Q_1 ——脱硫前烟气流量， Nm^3/h （101325Pa、 0°C ，干基）；

Q_2 ——脱硫后烟气流量， Nm^3/h （101325Pa、 0°C ，干基）；

3.4 适用条件与负荷设计依据

本技术适用于 500t/d~12000t/d 规模、配备 4~6 级旋风预热器的新型干法水泥熟料生产线，处理烟气体量（干基）不宜高于 100 万 Nm^3/h ，处理烟气中 SO_2 浓度（小时均值，干基折算）不宜高于 $600\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，瞬时值最高不应高于 $1500\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

新建项目脱硫工程的设计烟气体量、 SO_2 浓度等烟气设计参数宜采用最大连续工况下的数据；改扩建项目则宜以实测值为基础，充分考虑参数变化趋势后综合确定，或通过与同类工程类比明确。同时，应根据工程设计需求，全面收集烟气理化性质等原始资料，主要包括烟气体量（正常值、最大值、最小值）、烟气温度及变化范围（正常值、最大值、最小值及露点温度）、烟气中 SO_2 、 O_2 、 CO 等

相关气体成分及浓度（正常值、最大值、最小值），以及原燃材料硫的存在形态、含硫量与生料磨工作制度。

3.5 脱硫工程细则

（1）一般规定

新建项目的烟气脱硫工程应与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用，其布置应符合工厂总体规划。设计文件应按规定的内容和深度完成报批、批准和备案，且脱硫工程建设应按国家工程项目建设规定的程序进行。脱硫工程的 SO₂ 排放浓度应符合国家和地方排放标准的要求。在设计时，应充分考虑燃料、原料及主体工程负荷的变化，以提高脱硫工艺系统的适应性和可调节性。脱硫工程所需的水、电、气等辅助介质应尽量由主体工程提供。同时，脱硫工程烟气排放自动连续监测系统（CEMS）的设置和运行应符合 HJ/T75、HJ/T76 的规定和地方环保部门的要求。此外，脱硫工程的设计、建设和运行维护还应符合国家及行业有关质量、安全、卫生、消防等方面法规和标准的规定。

（2）工程构成

水泥窑烟气复合脱硫工程包括脱硫粉剂存储与投加系统、脱硫水剂存储与喷加系统、控制系统等等。脱硫粉剂存储与投加系统包括脱硫粉剂储仓、仓顶收尘设备、仓底下料设备、计量设备、输送设备等；脱硫水剂存储与喷加系统包括脱硫水剂储罐、卸料设备、调配与均化设备、喷射系统、雾化喷枪等。复合脱硫控制系统包括变频器柜、PLC 柜、远程工控机、自动精准脱硫系统程序等。

（3）总平面布置

脱硫工程的布置应符合 GB 50187、GB 50016 及相应行业规范要求。脱硫工程宜布置在窑尾预热器框架与生料均化库附近，具体可根据厂区的实际情况调整。脱硫工程区域内道路的设计，应保证物料运输便捷、消防通道畅通、检修方便，满足场地排水的要求，并符合 GB J22 的要求。

脱硫工程管线布置应根据总平面布置、管道输送介质、施工维护和检修等因素确定，在平面及空间上应与主体工程相协调。管道集中布置应遵循以下原则：脱硫水剂管道布置在管架最下层，公用管道（清水管道与压缩空气管道）、电缆桥架依次在上层布置。

脱硫工程符合环境保护、消防、劳动安全和职业卫生要求。

3.6 工艺设计

脱硫工艺设计应采用成熟可靠、运行安全稳定、技术经济合理的工艺技术，

应在满足环保管理要求的前提下，充分考虑脱硫工程长期运行的可靠性和稳定性。脱硫工艺参数应根据排放要求、烟气特性、运行要求、燃料/原料品质、脱硫剂供应、水质情况等因素，经全面分析优化后确定。根据烟气性质、运行工况、烟气量及主体工程对脱硫工程的要求，脱硫工程的配置方式可选择单线单套或两条线共用一套水剂储存系统的模式。脱硫工程设计脱硫效率应依据国家和地方排放标准的要求确定。脱硫工程应设置供操作、测试、巡检、维护用的平台和扶梯，并符合 GB4053 的要求。

3.7 脱硫粉剂系统

脱硫粉剂储仓宜选用钢制料仓，并采用双锥体结构，并内置减压锥，容积不小于 80 m^3 ，储仓应符合 JB/T 4735.2 的规定。储仓顶部应设置除尘设备，宜采用袋式除尘器，应符合 JB/T 11642 的规定。给料装置宜采用螺旋喂料机，应符合 JB/T 11933 的规定。计量系统应设置一大一小两套计量秤，两套秤的计量输送能力应相差至少 5 倍，以应对工况变化，推荐计量范围为 $0.1\sim 10\text{ t/h}$ 。

3.8 脱硫水剂系统

脱硫水剂系统中所用离心泵宜配置 2 套，一套使用，另一套备用。脱硫水剂储仓宜选用不锈钢材质常压容器，容积不小于 70 m^3 ，并符合 NB/T 47003.1 的规定。液态水剂给料装置宜选用多级离心泵，推荐计量范围为 $0.3\sim 3\text{ m}^3/\text{h}$ ，离心泵应符合 GB/T 5656 的规定。脱硫水剂最佳反应温度范围为 $400^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$ ，对于五级预热器，脱硫水剂喷射点宜选择预热器 C2~C1 之间的上升管；对于六级预热器，脱硫水剂喷射点宜选择预热器 C3~C2 之间的上升管。脱硫水剂用量与脱除 SO_2 的质量比应 ≤ 3 ，对于有 SCR 脱硝系统的生产线，脱硫水剂用量宜小于生料喂料量的 0.6%，对于没有有 SCR 脱硝系统的生产线，脱硫水剂用量宜小于生料喂料量的 0.4%。

3.9 电气及控制系统

复合脱硫系统的控制参数至少包括脱硫粉剂仓料位、脱硫水液位、脱硫粉剂流量、脱硫水剂流量、脱硫水剂喷射压力、脱硫水剂雾化用压缩空气压力、烟囱排放口 SO_2 与 O_2 环保检测数据。应配套建设复合脱硫自动化控制系统，具备数据采集及处理、自动控制、程序保护、联动联锁、报警提示等功能，能够记录复合脱硫系统关键参数，并可同步调取多个参数的历史记录，实现所有接入设备的启动、停止、监控及异常工况的诊断处理。复合脱硫控制系统应将关键控制参数接入中央控制室工控机，并能够同步查看实时数据、历史数据和数据报表（包括

日报表、月报表)曲线,要求任意参数曲线可组合至同一界面中查看,复合脱硫系统关键参数存储能力达到 5 年以上。控制系统应具备智能化控制功能,投入的脱硫剂用量应实现跟随 SO₂ 排放浓度自动精准调节,在设定 SO₂ 小时排放平均值目标值后,自动精确调整脱硫剂投加量。宜布置 AI 智能脱硫先进控制系统,基于模型预测控制(MPC)原理结合最新 AI 技术和经典控制理论,通过边缘计算技术与环保技术的融合,将环保专业知识代码化与智能化,基于机器学习的时间序列(神经网络)+特征分解建模,预测大部分工况变化,实现 SO₂ 本底浓度的软测量,提高脱硫剂用量调节的及时性与精准度,实现烟气脱硫设施智能化管控。

3.10 主要工艺设备和材料

钢结构应符合 GB 50205 的规定;楼梯平台应符合 GB 4053 的规定;焊接件应符合 JC/T 532 的规定;机械涂漆防锈应符合 JC/T 402 的规定;设备及其部件的包装、运输、发运应符合 JC/T 406 的规定;电气及自动化设备的配电与控制应符合 GB 50295 的规定;电气设备接地装置应符合 GB/T 5226.1 的规定;电动机能效等级应符合 GB 18613—2020 表 1 中的 2 级规定;脱硫系统应采用集散控制系统(DCS),DCS 的网络安全应符合 GB/T 33009 的规定;系统通信模式宜采用光纤网络通信模式。

脱硫粉剂储罐宜采用碳钢材质,具体型号根据烟气性质、气象条件等确定;脱硫水剂储罐及管道、阀门等与脱硫水剂直接接触的设备应使用防腐材质,推荐 304 不锈钢材质;钢制设备所用的钢材应符合 GB912 的规定;脱硫水剂喷枪应使用耐高温、耐磨蚀材料,推荐 316L 不锈钢材质;保温油漆的设计宜参照 DL/T5072 的要求;复合脱硫系统所使用脱硫剂应符合标准要求。

3.11 安全与环保

脱硫系统机械电气安全应符合 GB/T 5226.1 的规定;脱硫系统直梯、斜梯、防护栏杆和工作平台应符合 GB 4053(所有部分)的有关规定。脱硫系统应设置防止意外启动的安全措施,应符合 GB/T 19670 的规定;传动装置的外露旋转部分应设置防护罩或防护网等安全防护装置;防护装置应符合 GB/T 8196 的规定。脱硫系统应设置安全警示标志,应符合 GB 2894 的规定。脱硫系统应设置联锁装置,应符合 GB/T 18831 的规定,同时应设置急停装置,应符合 GB/T 16754 的规定。

脱硫系统工作位置噪声控制应符合 GB/T 50087 的规定;脱硫粉剂储仓顶部应设置除尘设备,宜采用袋式除尘器,应符合 JB/T 11642 的规定。

3.12 运行与维护

(1) 一般规定

脱硫工程的运行、维护及安全管理除应符合本规范外，还应符合相应行业设施运行的有关规定；根据燃料、原料及主体工程负荷的变化及时调整，保证 SO_2 连续稳定达标排放；满足设计工况的条件下进行，并根据工艺要求定期对各类设备、电气、自控仪表进行检查维护，确保装置稳定可靠运行。主体工程启停机时应安排脱硫工程先开后停。工厂应建立健全与脱硫工程运行维护相关的各项管理制度，以及运行、操作和维护技术规程；建立脱硫工程、主要设备运行状况的台帐。

(2) 特殊要求

脱硫剂用量的调整总体以“快加慢减”为原则，确保排放数据稳定达标，并兼顾经济性原则，避免过量使用造成脱硫剂浪费与逃逸。生料磨停磨期间，应严格控制脱硫水剂用量，以粉剂为主进行调整，水剂用量不得超过生料磨运行期间的平均用量，防止其它环保指标超标；生料磨停磨前 15 分钟，加大脱硫粉剂用量至开磨用量的 3 倍，以应对生料磨停机时的 SO_2 波动；脱硫剂应提供 MSDS（化学品安全说明书）与成分检测报告，确保不对环境产生二次污染。

(三) 确定标准中关键内容的论据

1. 脱硫水剂

标准中明确了脱硫水剂系统的关键参数，包括：水剂储罐容积不小于 70m^3 且采用不锈钢材质、多级离心泵计量范围为 $0.3\sim 3\text{m}^3/\text{h}$ 、喷射点位置（五级预热器选 $\text{C}_2\sim\text{C}_1$ 上升管，六级预热器选 $\text{C}_3\sim\text{C}_2$ 上升管）、最佳反应温度区间为 $400^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$ ，以及单套系统水剂用量宜小于 $1.5\text{t}/\text{h}$ 、不应超过 $2\text{t}/\text{h}$ 。

上述关键参数的确定基于大量工程实测与运行数据统计。关于喷射点位置与反应温度范围，通过对多条水泥生产线不同喷射点的对比试验发现，在 $400^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$ 温度区间内，脱硫水剂与烟气中 SO_2 的反应效率最高，可达 85% 以上；当温度低于 350°C 时，反应速率显著下降；高于 650°C 时，脱硫剂分解加快，有效利用率降低 30% 以上。选择 $\text{C}_2\sim\text{C}_1$ 或 $\text{C}_3\sim\text{C}_2$ 上升管作为喷射点，正是基于该区间温度场最稳定的实际运行数据。关于水剂用量上限的确定，来源于对 400 余条生产线停磨工况的跟踪统计：当水剂用量超过生料喂料量的 0.6% 时，预热器内温度波动过大，且尾排风机压力增加，对于没有 SCR 脱硝系统的生产线，脱硫水剂用量宜小于生料喂料量的 0.4%，进一步控制氨逃逸风险。脱硫水剂用量与

脱除 SO_2 的质量比应 ≤ 3 ，也是基于脱硫剂反应效率与实际脱硫工况数据得出，该比值超过 3 时，反映出脱硫水剂过量使用，经济性下降并存在逃逸风险。

2. 脱硫粉剂

标准中明确了脱硫粉剂系统的关键参数，包括：粉剂储仓采用双锥体钢制料仓且内置减压锥、容积不小于 80m^3 ，给料装置采用螺旋喂料机，计量系统设置一大一小两套计量秤且两者计量输送能力相差至少 5 倍，推荐计量范围为 $0.1\sim 10\text{t/h}$ 。

上述参数的确定主要依据设备运行经验与物料流动性试验数据。关于储仓结构与容积，通过对不同容积（ 50m^3 、 80m^3 、 100m^3 ）储仓的运行对比发现：容积小于 80m^3 时，在主体工程满负荷工况下需每天补料 2~3 次，增加了操作频次与扬尘风险；双锥体加内置减压锥的结构设计，经粉体流动性测试验证，可有效消除粉剂架桥和漏斗流现象，下料可靠性提升约 60%。关于计量秤的量程比（相差至少 5 倍），基于对不同工况下 SO_2 波动幅度的统计：主体工程启停机或生料磨开停时， SO_2 排放浓度可在 10 分钟内变化 5~8 倍，单一量程的计量秤难以兼顾低流量时的精度（误差 $>\pm 5\%$ ）与高流量时的输送能力。采用一大一小两套秤（如 $0.1\sim 2\text{t/h}$ 小秤与 $2\sim 10\text{t/h}$ 大秤），在实际运行中可将计量误差控制在 $\pm 2\%$ 以内，同时满足工况突变时的快速响应需求。脱硫粉剂用量与脱除 SO_2 的质量比应在 0.1~1.0 之间，也是基于脱硫剂反应效率与实际脱硫工况数据得出，该比值低于 0.1 时，钙基成分偏少，总体反应效率下降，该比值高于 1.0 时，反映出脱硫粉剂过量使用，经济性显著下降，脱硫成本明显升高。

3. 脱硫系统的调整

标准中明确了脱硫系统运行调整的核心原则与特殊要求，包括：脱硫剂用量调整以“快加慢减”为原则；生料磨停磨期间，水剂用量不得超过正常运行期间的平均用量；停磨前 15 分钟，粉剂用量加大至开磨用量的 3 倍；控制系统应具备根据 SO_2 排放浓度自动精准调节脱硫剂用量的智能化功能。

上述调整原则来源于多条生产线长期运行的经验总结与数据统计分析。关于“快加慢减”原则，通过对 SO_2 波动事件的追踪分析发现：当 SO_2 浓度快速上升时，若脱硫剂增加响应延迟超过 2 分钟，超标风险增加约 70%；反之，当 SO_2 浓度下降时，过快减少脱硫剂容易造成排放值反复波动，因此采用慢减策略可使排放曲线更平稳，波动幅度降低约 50%。关于停磨前 15 分钟加大粉剂用量的规定，基于对 30 次生料磨停机事件的监测数据：停磨后烟气湿度下降、 SO_2 解析

释放，通常在停磨后 5~8 分钟出现浓度峰值（可达正常值的 2~4 倍），提前 15 分钟增加粉剂用量至 3 倍，可有效覆盖该峰值期，确保排放不超标。关于水剂用量限制的依据见前述氨逃逸与 CPM 统计结果。智能化自动调节功能则基于 PID 闭环控制试验，相比人工调节，可将 SO₂ 小时均值超标次数减少 80%以上，同时节省脱硫剂用量约 10%~15%。

4. 重要参数选择依据

4.1. 入口 SO₂ 浓度

入口 SO₂ 浓度是脱硫系统工艺适配、设备选型及运行成本核算的核心基础参数，指脱硫系统入口烟气中 SO₂ 经基准氧含量 10%折算后的干基浓度，直接决定脱硫技术路线选择、脱硫剂用量配置及反应体系设计。

复合脱硫系统通过粉剂与水剂协同反应实现高效脱除，结合全国近 400 条生产线的应用验证，其入口 SO₂ 浓度适用上限为平均 600mg/Nm³，瞬时峰值 1500mg/Nm³，在此范围内可通过灵活调整脱硫剂投加量实现稳定达标；若浓度超过此范围，将导致脱硫剂消耗激增，不仅大幅提升运行成本，还可能影响水泥熟料生产配料平衡，经济性与实操性显著下降。

4.2. 处理烟气体量

烟气处理能力是确定脱硫系统规模及设备选型的基础参数，指单位时间内系统可稳定处理的干态烟气体积，其数值大小主要与水泥生产线产能规模、窑系统原料特性、煅烧温度及实际产量密切相关，直接决定脱硫系统的设备规格、管路设计及反应空间布局。目前国内水泥生产线规模主要为 2500~10000t/d，对应烟气体量范围约为 10 万~100 万 m³/h（干基）。复合脱硫系统在实际工程应用中，需综合考虑脱硫反应效率、设备投资及运行经济性。基于全国近 400 条生产线的应用验证，当处理烟气体量超过 100 万 m³/h（干基）时，系统风量负荷增大，可能导致气液分布不均、反应停留时间缩短，进而影响脱硫效率与运行稳定性。因此，本标准规定复合脱硫系统的烟气处理能力适用范围为不大于 100 万 m³/h（干基），以确保系统在合理工况下实现高效稳定运行。

4.3. 脱硫粉剂计量范围

脱硫粉剂计量系统作为复合脱硫系统精准调控脱硫剂投加量的核心设备，需配置一大一小两套计量秤且二者计量输送能力差值不低于 5 倍，以此构建宽量程、高精度的计量调节体系，灵活适配水泥生产线负荷波动、烟气 SO₂ 浓度变化等复杂工况，该系统推荐综合计量范围为 0.1~10 t/h。该范围的选择依据在于：

下限 0.1 t/h 可满足入口 SO_2 浓度较低或低负荷工况下的微量投加需求,避免过量投加造成脱硫剂浪费及对熟料成分的干扰;上限 10 t/h 则可实现大剂量快速响应,确保脱硫效率稳定达标;一大一小两套秤的量程倍数差设计,既保证了低浓度工况下的计量精度,又兼顾了高浓度或工况波动时的输送能力,避免单秤在小流量下精度不足、大流量下能力受限的问题。

4.4. 脱硫水剂喷射位点选择

脱硫水剂的喷射位点与用量需结合预热器级数规划,五级预热器的脱硫水剂喷射点宜选在预热器 $\text{C}_2\sim\text{C}_1$ 之间的上升管,六级预热器则宜选定在 $\text{C}_3\sim\text{C}_2$ 之间的上升管,脱硫水剂的最佳反应温度范围为 $400^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$,且单系统的脱硫水剂用量应控制在 2 t/h 以内。

相关论文研究表明,石灰石中主要含硫矿物黄铁矿 (FeS_2) 在 310°C 时开始由稳定态向介稳态转变, 500°C 时开始显著分解释放 SO_2 ,该分解过程可持续至 620°C ,也即水泥预热器系统中 SO_2 的大量释放区域集中于 $\text{C}_2\sim\text{C}_3$ 旋风筒之间,此区域烟气温度约为 $500\sim 620^\circ\text{C}$ 。脱硫水剂的喷射位点需与 SO_2 释放规律相匹配,若喷射点位于 SO_2 释放点之后, SO_2 已随烟气向上流动,会大幅缩短脱硫水剂与 SO_2 的反应停留时间,降低脱除效率;若喷射点所处区域温度过高,脱硫水剂易快速分解失效,同样影响脱硫效果。因此,脱硫水剂的最佳喷射点应设于 SO_2 大量释放区域之前或释放同期,且喷射点的温度窗口需兼顾脱硫剂的反应活性。

复合脱硫所用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 基脱硫剂的反应活性与温度高度相关,其在 $400\sim 600^\circ\text{C}$ 范围内具备最佳脱硫反应活性:温度过低时,脱硫剂与 SO_2 的化学反应速率不足,无法实现高效脱除;温度过高时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会过早分解为 CaO ,而相关研究数据显示, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的脱硫效率(硫含量 12.35%)显著优于 CaO (硫含量 2.01%),因此需在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 尚未大量分解的 $400\sim 600^\circ\text{C}$ 温度区间完成对 SO_2 的高效捕集。五级预热器选取 $\text{C}_2\sim\text{C}_1$ 之间、六级预热器选取 $\text{C}_3\sim\text{C}_2$ 之间的上升管作为喷射点,正是基于上述 SO_2 释放规律与脱硫剂反应特性的双重考量,可让脱硫水剂在最佳活性温度区间与 SO_2 充分接触反应,实现脱硫效率的最大化。

三、主要试验(或验证)的分析,综述报告,技术经济论证,预期的经济效果

1. 新型干法水泥窑烟气复合脱硫固硫系统概述

脱硫粉剂由散状物料运输车进厂,利用车载气力泵直接泵送进脱硫粉剂储

仓。储仓内的脱硫粉剂经计量输送系统进入生料均化库库底入窑生料输送斜槽（图 3-1），与生料粉混合后经入窑提升机进入预热器内。

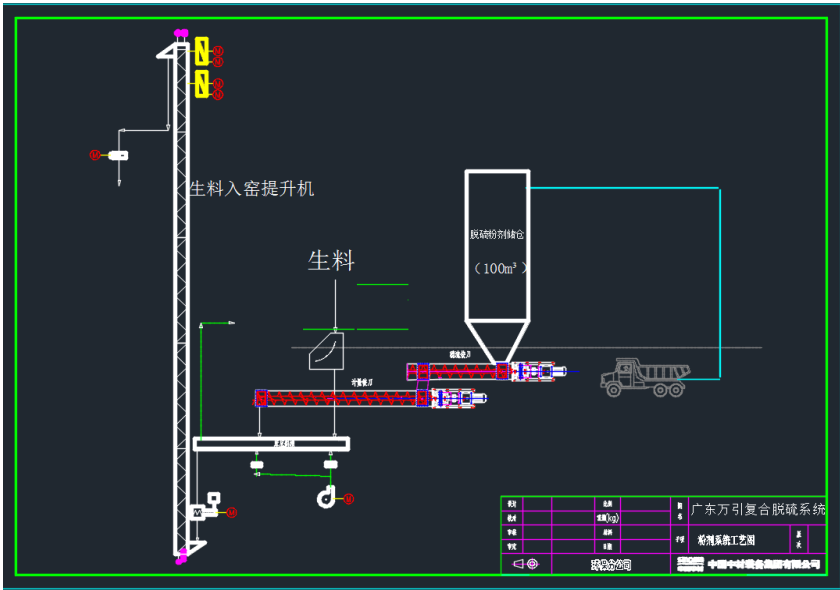


图 3-1 脱硫固硫粉剂投加装置示意图

脱硫水剂由液体槽罐车运输进厂，利用离心泵将脱硫水剂直接泵送进脱硫水剂储罐。在预热器 C₂ 旋风筒上升风管处均匀对称布置喷枪，喷雾系统采用了特别设计的双流体内混式喷枪（图 3-2），将脱硫水剂雾化成平均粒径为几十微米的细小液滴，确保了喷雾的覆盖率，从而延长脱硫的反应时间，加快反应速度，提高反应效率。

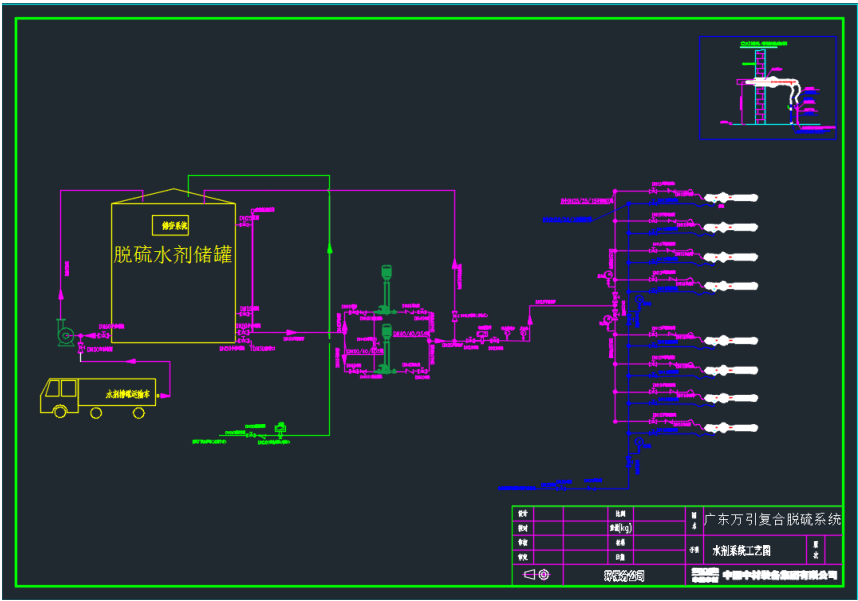


图 3-2 脱硫水剂喷加装置示意图

新型干法水泥窑烟气复合脱硫固硫系统占地面积约 35m²，生料均化库旁

4m*8m 长方形场地即可，脱硫系统总装机功率约 35kw，总工期约 30 天，脱硫自动化控制采用独立 PLC 系统，中控室增加工控机。具体组成见表 3-1。

表3-1新型干法水泥窑烟气复合脱硫固硫系统

序号	名称	数量	单位
1	脱硫粉剂储仓	1	个
2	计量输送系统	2	套
3	收尘设备	1	台
4	辅助下料系统	1	套
5	料位探测设备	1	套
6	不锈钢脱硫水剂储罐	1	个
7	喷射与计量控制系统	1	套
8	雾化喷枪	8	套
9	液位探测设备	1	套
10	水剂循环均化系统	1	套
11	电气控制柜系统	1	套
12	控制模块、接 DCS 系统相关设备	1	套

2. 复合脱硫固硫技术工业试验

2.1 脱硫试验

为验证上述脱硫剂及催化剂在工业水泥窑中的 SO₂ 捕集效果，在某 5000t/d 水泥生产线进行工业试验。该生产线石灰石硫含量约为 0.9%，窑尾烟气中 SO₂ 浓度约为 900mg/Nm³（开磨期）。选取 Ca(OH)₂ 作为脱硫剂，选取多种过渡金属作为 SO₂ 捕集过程中的催化剂。其中，脱硫剂投加量为生料投加量的 0.2%~0.5%，四种催化剂与脱硫剂的摩尔比均为 0.5%（见表 3-2）。脱硫剂与催化剂混合均匀后随生料一起投加入水泥窑中。

表 3-2 脱硫剂投加量及催化剂掺量表

脱硫剂	催化剂掺量 (占脱硫剂比例)	脱硫剂投加量 (占生料质量比例)	钙硫比
Ca(OH) ₂	0.5%	0.2%	2
		0.3%	3
		0.4%	4
		0.5%	5

2.2 脱硫性能

试验开始前 3h 对该生产线窑尾烟气 SO_2 排放进行监测，由图 3-3 可知， SO_2 本底排放为 $1000\text{mg}/\text{Nm}^3$ 左右。第 3 小时开始投加脱硫剂及催化剂（生料质量的 0.2%），3~4h 内 SO_2 排放量变化较小，5h 后 SO_2 排放量开始下降并稳定于 $700\sim 800\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，12~13.5h 内， SO_2 排放量仍稳定于 $700\sim 800\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。13.5h 后脱硫剂投加量增加至生料质量的 0.3%， SO_2 排放量开始平稳降低，19h 降低至 $600\text{mg}/\text{Nm}^3$ 且稳定至 20h。实验第 20 小时，脱硫剂投加量增加至生料质量的 0.4%， SO_2 排放量继续下降，27h 降至 $500\text{mg}/\text{Nm}^3$ 左右，36h~37.5h 内 SO_2 排放量下降至 $400\text{mg}/\text{Nm}^3$ 左右（6~12h、27h~36h 为停磨期为采集数据），37.5h 后脱硫剂投加量增加至生料质量的 0.5%， SO_2 排放量持续降低，47h 时降至最低值（ $70\text{mg}/\text{Nm}^3$ ），并始终稳定在 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以内；实验第 49 小时停止投加脱硫剂与催化剂， SO_2 排放由 $400\text{mg}/\text{Nm}^3$ 迅速恢复至 $1200\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

由上可知，含催化剂 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可有效降低水泥窑 SO_2 排放量，且随脱硫剂投加量的增加 SO_2 排放量逐渐降低，当脱硫剂投加量为生料质量的 0.5% 时， SO_2 排放量降低至 $200\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下。脱硫剂及催化剂加入预热器后，1h 内 SO_2 排放量不会降低，说明脱硫剂及催化剂在预热器中达到一定浓度或形成一定氛围后，脱硫剂及催化剂才开始发挥作用。停止投加脱硫剂后，预热器中的脱硫氛围不会立即消失，表现为 SO_2 排放量缓慢回升。

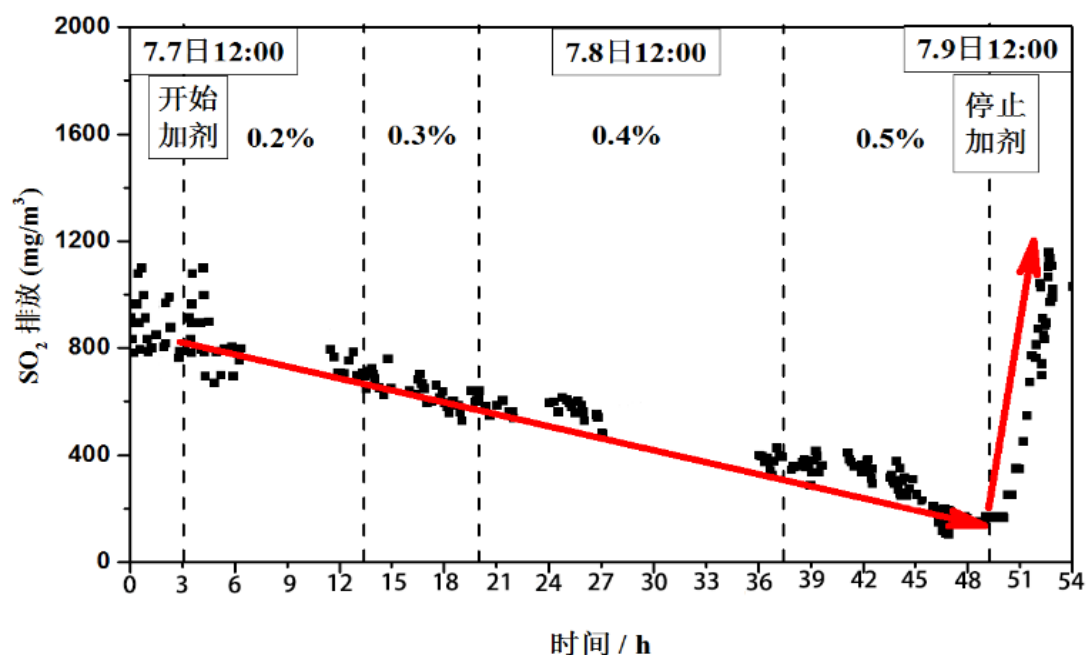


图 3-3 工业 SO_2 捕集试验中窑尾烟气硫排放量变化

2.3 硫平衡核算

水泥窑中的硫由生料及煤引入，在水泥窑系统内部进行迁徙，最终由熟料及烟气带出水泥窑，在此过程中存在硫的输入与输出平衡，即生料、煤引入的 SO_3 量等于熟料、烟气带出的 SO_3 量。为进一步验证工业实验中脱硫剂（催化剂）对 SO_2 的捕集效果及水泥窑中硫的迁徙途径，对上述 5000t/d 水泥生产线进行长期脱硫实验，依据原、燃料及熟料的全硫含量（如表 3-3 所示），分别计算该水泥生产线在脱硫试验前及脱硫试验过程中单位时间（1h）内硫的输入量及输出量（以 SO_3 质量表示）。

该水泥生产线所用生料的含硫量为 $\text{SO}_3(\text{生料})=0.898\%$ ，1h 内生料的投加量为 $m(\text{生料})=380\text{t}$ ，1h 内由生料带入水泥窑的 SO_3 质量 $M(\text{生料})$ 计算如下：

$$M(\text{生料})=\text{SO}_3(\text{生料})\times m(\text{生料})=0.00898\times 380\text{t}=3.41\text{t}$$

所用煤的含硫量为 $\text{SO}_3(\text{煤})=1.23\%$ ，1h 内耗煤量为 $m(\text{煤})=33\text{t}$ ，1h 内由煤带入水泥窑的 SO_3 质量 $M(\text{煤})$ 计算如下：

$$M(\text{煤})=\text{SO}_3(\text{煤})\times m(\text{煤})=0.0123\times 33\text{t}=0.41\text{t}$$

脱硫试验前后，产熟料的含硫量分别为 $\text{SO}_3(\text{熟料前})=1.34\%$ ， $\text{SO}_3(\text{熟料中})=1.53\%$ ，1h 内的熟料产量为 $m(\text{熟料})=245\text{t}$ ，故两种条件下中所产熟料中 SO_3 质量 $M(\text{熟料前})$ 及 $M(\text{熟料中})$ 分别计算如下：

$$M(\text{熟料前})=\text{SO}_3(\text{熟料前})\times m(\text{熟料})=0.0134\times 245\text{t}=3.28\text{t}$$

$$M(\text{熟料中})=\text{SO}_3(\text{熟料中})\times m(\text{熟料})=0.0153\times 245\text{t}=3.75\text{t}$$

脱硫试验前后，水泥窑烟气 SO_2 排放分别为 $1000\text{mg}/\text{Nm}^3$ 、 $200\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，1h 内窑尾烟气排放量为 $V(\text{烟气})=400000\text{Nm}^3/\text{h}$ ，则 1h 内随烟气排出 SO_3 质量为：

$$M(\text{烟气前})=C_{\text{SO}_2}\times V(\text{烟气})\times 80/64=1000\times 80/64\times 10^{-9}\times 400000\text{t}=0.50\text{t}$$

$$M(\text{烟气后})=C_{\text{SO}_2}\times V(\text{烟气})\times 80/64=200\times 80/64\times 10^{-9}\times 400000\text{t}=0.10\text{t}$$

综上所述，脱硫试验前 1h 内水泥窑系统硫平衡如下：

$$M(\text{熟料前})+M(\text{煤前})=3.41\text{t}+0.41\text{t}=3.82\text{t}\approx 3.28\text{t}+0.5\text{t}=M(\text{熟料前})+M(\text{烟气前})$$

脱硫试验前 1h 内水泥窑系统硫平衡如下：

$$M(\text{生料前})+M(\text{煤前})=3.41\text{t}+0.41\text{t}=3.82\text{t}\approx 3.75\text{t}+0.1\text{t}=M(\text{熟料前})+M(\text{烟气前})$$

可见，复合脱硫的本质是将烟气中的 SO_2 固化于水泥熟料中。

表 3-3 某 5000t/d 水泥生产线中原、燃料及熟料全硫含量

样品	石灰石	生料	煤	熟料	SO_2 排放 (mg/Nm^3)
脱硫试验前	0.875%	0.898%	1.23%	1.34%	1000
脱硫试验中	0.875%	0.898%	1.23%	1.53%	200

1. 经济与社会效益分析

3.1 技术经济论证

新型干法水泥窑烟气复合脱硫技术针对水泥生产线工艺特点，提出将干法脱硫技术和半干法脱硫技术有机复合的新思路，大幅度提高了烟气脱硫速度、效率。通过调控脱硫粉剂和脱水剂在新型干法生产线的投加位置，实现了快速烟气脱硫（6-8min 内将烟气中 SO_2 浓度降低至 35mg/m^3 ）和烧成过中熟料高效固硫（将 $>97\%$ 原材料硫固化于熟料），最终实现了新型干法水泥窑烟气低成本、高效脱硫，该技术与当前同类技术主要参数对比见表 3-4。可见，复合脱硫技术低投入、低成本、低能耗、高效率，建设成本是湿法脱硫的 1/20，运行成本是其它脱硫技术的 1/2；占地面积 30m^2 ，装机功率小于 40kW ，建设周期不超过 35 天。

复合脱硫技术能够满足水泥工业大气污染物排放更严格的标准，该技术建设成本少、运行成本低、装机功率小、脱硫效率高，简便易行，系统稳定可靠，是水泥行业 SO_2 减排技术的首选方案，

表 3-4 复合脱硫技术运行成本测算

入窑生料 SO_3 (%)	SO_2 排放最高浓度 (mg/Nm^3)	控制 50mg/Nm^3 成本 (元 /t.cel)	控制 35mg/Nm^3 成本 (元 /t.cel)
0.1-0.15	200	0.4-0.6	0.6-0.8
0.15-0.2	300	0.6-0.8	0.8-1.0
0.2-0.3	500	1.2-1.6	1.3-2.0
0.3-0.4	800	1.8-2.0	2.0-2.6
0.4-0.5	1000	2.2-2.8	2.5-3.2
0.5-0.6	1300	2.3-3.2	2.8-3.5
0.6-0.7	1600	3.0-3.5	3.5-4.0

总结水泥行业各种烟气脱硫工艺技术的性能和优缺点发现，石灰石（石灰）/石膏法湿法烟气脱硫技术的脱硫效率达到了 95%以上，但工艺较为复杂、设备容易腐蚀，导致投资和运行成本大，且湿法脱硫若经过除雾或除雾不完全，可能导致脱硫石膏随烟气排出，在排放源周围形成明显的硫酸盐沉降，也就是俗称的“石膏雨”现象，另外湿法脱硫浆液中毒导致脱硫效率显著下降也是水泥行业需要重点关注的问题之一。目前湿法烟气脱硫技术主要适用于烟气排放量大， SO_2 浓度高的生产线。

干法烟气脱硫技术流程简单、设备占地面积小、投资较少，但需大量使用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，会造成水泥生料易烧性变差，本身脱硫反应效率与速率均较差，很难

满足现阶段超低排放控制要求。

总体来看，干法/半干法脱硫效率偏低，不太能够适应水泥超低排放指标要求，湿法脱硫与复合脱硫技术效率较高，均能够满足超低排放要求，二者运行成本也较为接近，但湿法脱硫的建设投资约为复合脱硫的 15~20 倍，湿法脱硫电耗约为复合脱硫的 100 倍，湿法脱硫更适合于 SO₂ 本底浓度超高（>1500mg/Nm³ 以上）的生产线，对于中低浓度 SO₂ 的生产线，复合脱硫在建设投资、运行成本、能耗等关键指标上均具有显著优势。

表 3-5 新型干法水泥窑烟气复合脱硫技术与当前同类技术主要参数对比

脱硫技术	干法脱硫	湿法脱硫	复合脱硫
脱硫剂	石灰粉	CaO、CaCO ₃	脱硫水剂、粉剂
脱硫效率	50~60%	90~99%	≥98%
对生产影响	影响易烧性	增加系统阻力约 1000Pa	降低预热器出口温度<5℃
运行成本	5~10 元/t.cel (连续运行)	2~5 元/t.cel	0.5~3.8 元/t.cel
运行能耗	10~20kw	800~1500kw	7.5~15kw
主要成本	脱硫剂	电耗、水耗、脱硫剂	脱硫剂
投资额度	≤100 万元	≥1800 万元	≤118 万元
适用水平	≤300mg/Nm ³	≥1500mg/Nm ³	≤1500mg/Nm ³
主要优势	系统简单可靠	脱硫效率高	成本低，效率高
主要劣势	成本高，效果不稳定	投资高，电耗高 占地大、设备腐蚀、运维成本高	指定专利产品

3.2 预期经济效果

复合脱硫系统占地小、能耗低，初期投资成本仅为湿法脱硫的 1/20，运行成本为其他脱硫技术的 1/2，效果稳定可靠。在常规水泥窑工艺条件下，该系统可使烟气中 SO₂ 排放浓度（200~1500mg/Nm³）在 5~8 分钟内降至 35mg/Nm³ 以下，脱硫成本控制在 0.5~3.8 元/吨熟料。标准中设定的脱硫粉剂和水剂指标已通过多条生产线的实际验证，脱硫粉水剂所含主要成分均为常见工业原料，来源稳定，供应充足。技术风险主要在于脱硫剂品质波动对效果的影响，本标准通过设定严格的指标要求，有效控制了这一风险。复合脱硫技术已完成工业试验验证，

技术成熟度达到 TRL9 级（技术成功商业化，广泛应用于市场）。

该技术已在中国建材、金隅冀东、海螺水泥、华润水泥、华新水泥、红狮水泥、山水集团等大型水泥集团的 400 多条水泥生产线上成功应用，均能将烟气中 SO_2 排放稳定降至 $35\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以下，满足国家及地方相关环保标准要求，技术经济指标达到国际领先水平。以 $5000\text{t}/\text{d}$ 水泥生产线为例，按本底排放 $1000\text{mg}/\text{Nm}^3$ 计算，采用复合脱硫技术后，每年可减少 SO_2 排放约 2850 吨，显著降低排污费用，具有突出的经济、社会与环境效益。本标准通过对脱硫粉剂和水剂技术指标的统一规范，有利于保障脱硫效果、降低用户选型成本、促进技术推广应用，对水泥行业 SO_2 超低排放改造具有重要支撑作用。

3.3 社会效益分析

（1）环境影响方面：

通过预热器快速脱硫、回转窑高效固硫，显著提高生产过程协同烟气脱硫效率，无需额外设备、能耗，不产生废液和固废等其他二次污染。水泥行业作为我国主要大气污染物的第三大行业，具有实施本技术的可行性和需求，是本技术大规模推广应用的重要基础。若将本技术推广至全国 70% 的水泥企业，并且按照平均减排二氧化硫 60% 计算，预计每年可减少超过 10 万吨的 SO_2 排放，对改善空气质量和环境保护具有重大意义。另外与传统湿法脱硫相比，复合脱硫技术避免了高含水量烟气排放，减少了烟囱白雾浓烟现象，有效避免了“石膏雨”的二次污染，同时改善了视觉观感。

（2）水泥工业经济效益方面：

复合脱硫技术通过最大限度发挥新型干法水泥工艺自身脱硫和固硫能力，将硫固化于熟料但不影响熟料品质，可显著降低窑内硫循环、减少结皮堵塞等问题，提高水泥窑运转效率。该技术设备简单、可靠，其建设成本仅为湿法脱硫系统的 5%，后期运行成本仅为其它脱硫技术的一半，大幅度降低了水泥生产企业 SO_2 环保达标成本。另外目前水泥工业可利用的替代原燃料通常含硫量较高，大量使用后导致 SO_2 排放超标，无法大比例替代现有原燃料，应用本技术后可降低烟气脱硫成本，提高含硫替代燃料用量，产生显著经济效益。复合脱硫技术已经成为水泥工业烟气脱硫的趋势，对整个水泥行业节能、减排产生深远的影响和积极的推动作用。

（3）资源综合利用方面：

我国水泥产量和消耗均居世界首位，但优质石灰石等原燃料资源短缺，仅供40~50年使用。由于含硫废弃物协同处置、高品位资源减少、地域限制水泥厂不得不使用高硫原料，导致水泥窑烟气硫排放必然增加。复合脱硫技术恰好弥补了这一技术空白，技术实施后，水泥厂可大量应用此前无法利用的高硫原燃材料，如高硫石灰石、煤等，减少了资源浪费，并降低了原燃材料采购成本；还可促进矿山科学开采，实施本技术后，水泥窑用石灰石不再需要关注硫含量，矿山高硫石灰石得以利用，实现矿山开采的各种品质矿石的综合消纳，避免开采后的闲置浪费，有利于实现矿山科学开采与全面利用；对于煤矸石（普遍 $St_{ad} > 1.0\%$ ）等高硫固废，本技术的应用使得大量煤矸石可作为水泥替代原料使用而不会导致烟气硫排放超标，充分利用其热值，降低生产成本，并实现固废的资源化利用。可促进水泥窑协同处置含硫废弃物、高硫原料利用等技术的推广，对水泥工业节能减排、可持续发展和实现资源高效综合利用具有重要的经济、社会和环境意义。

四、国内外相关标准调研

（一）国外相关标准

经调研，国外目前尚无专门针对水泥窑烟气“复合脱硫”技术的专项标准。美国机械工程师协会（ASME）发布的 ASME PTC 40-2017《烟气脱硫装置》标准，系统规定了适用于各行业的湿法、半干法及干法脱硫工艺的流程、设备与效率测试方法。美国材料实验协会（ASTM）的相关标准，如 ASTM C1318-15a(2020) 与 ASTM D8339-20，则分别规定了脱硫剂（石灰）总中和能力、有效成分及脱硫固体产物中硫含量的通用测试方法。然而，上述标准均为面向通用脱硫技术或脱硫剂的普适性规范，并未涵盖以复合脱硫工艺及其专用催化脱硫剂。与此同时，在欧盟地区，其主流催化技术（如选择性催化还原（SCR）技术、陶瓷纤维催化滤管技术）以脱硝为核心，对二氧化硫的治理通常需另配独立的脱硫装置。综上，国内外均缺乏与水泥窑烟气复合脱硫技术直接相关的先进标准或技术规范。

（二）国内相关标准

国内已发布的脱硫相关标准主要分为通用脱硫标准 and 水泥行业专用脱硫标准两大类。通用脱硫标准方面，GB/T 19229 系列涵盖湿法、干法/半干法及海水脱硫设备的技术要求，GB/T 21508-2025 规定了燃煤烟气脱硫设备的性能测试方法，GB/T 34605-2017 则涉及脱硫装备运行效果评价。水泥行业专用脱硫标准方面，GB/T 35150.6-2024《新型干法水泥生产成套装备技术要求第6部分：脱硫系统》已于2025年6月1日正式实施，适用于水泥脱硫系统的设计、制造、安装

验收和性能测试

（三）与国内相关标准间的关系

目前，我国已发布的《烟气脱硫工艺设计标准》（GB 51284-2018）等通用标准对脱硫工艺设计进行了基础性规定，并针对火电、电解铝、冶金等行业制定了相应的脱硫工程技术规范及脱硫剂产品标准，而《新型干法水泥生产成套装备技术要求第 6 部分：脱硫系统》（GB/T 35150.6-2024）仅对水泥行业常用的湿法脱硫、复合脱硫、干法脱硫提出了一般性要求，仍缺乏具体使用方法和针对特定先进工艺的专用技术标准。尤其对于水泥窑烟气复合脱硫技术这一具有我国自主创新特色、脱硫效率高、投资运行成本低且无二次污染、已在 400 余条生产线上成功应用的先进技术，目前国内外均无针对性的工程技术规范。本标准的制定不仅衔接现有相关标准内容，还聚焦于复合脱硫系统的设计、建设、验收及使用维护，填补该先进技术领域专用标准的空白，为水泥行业烟气治理提供更具先进性、适用性和可操作性的技术依据。

五、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

本标准与现行国家相关法律、法规、规章及强制性标准具有兼容性，无冲突。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

七、国家标准作为强制性国家标准或推荐性国家标准的建议

建议本标准作为团体标准发布实施。

八、贯彻国家标准的要求和措施建议（包括组织措施、技术措施、过渡办法等内容）

各有关企业，应积极准备技术图样、工艺装备和相应的技术改造。待本标准发布实施后，建议由标委会秘书处协助起草工作组单位对行业内的制造、使用、质检单位进行宣贯。建议在标准发布半年后实施。

本标准发布后，由起草工作组对该标准进行宣贯，望各生产厂家积极组织有关人员学习，实施 10 个月后，凡是水泥窑烟气复合脱硫工程企业一律按本标准组织产品设计、生产、检验、以及裁决。

九、废止现行有关标准的建议

本标准为新制定团体标准，不存在相关标准废止问题。

十、其他应予说明的事项

无。

