



团 体 标 准

T/CCAS 0XX—202X

水泥窑烟气复合脱硫工程技术规范

Technical Specification for Hybrid Flue Gas Desulfurization of Cement Kiln

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX

实施

中国水泥协会 发布

中国标准出版社 出版

目 次

前 言..... II

1 范围..... 3

2 规范性引用文件..... 3

3 术语和定义..... 4

4 适用条件与负荷设计依据..... 5

5 总体要求..... 6

6 工艺设计..... 7

7 主要工艺设备和材料..... 9

8 安全环保..... 9

9 运行与维护..... 12

10 交货文件..... 13

参 考 文 献..... 13

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国水泥协会提出并归口。

本文件起草单位：华南理工大学、广东万引科技股份有限公司、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

本文件主要起草人：张同生、陈新智、陶从喜、刘宁、余云祥、彭卉、

本文件主要审查人：

水泥窑烟气复合脱硫工程技术规范

1 范围

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。

本文件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

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 2894 安全标志及其使用导则

GB 4053 固定式钢梯及平台安全要求

GB 4915 水泥工业大气污染物排放标准

GB 18613-2020 电动机能效限定值及能效等级

GB 19762 清水离心泵能效限定值及节能评价

GB 21508 燃煤烟气脱硫设备性能测试方法

GB 50016 建筑设计防火规范

GB 50187 工业企业总平面设计规范

GB 50205 钢结构工程施工质量验收标准

GB 50264 工业设备及管道绝热工程设计规范

GB 50295 水泥工厂设计规范

GB 51284 烟气脱硫工艺设计标准

GB/T 3797 电气控制设备

GB/T 4237 不锈钢热轧钢板和钢带

GB/T 5226.1 机械电气安全 机械电气设备 第1部分 通用技术条件

GB/T 5656 离心泵 技术条件(II类)

- GB/T 7251.1 低压成套开关设备和控制设备 第1部分：总则
- GB/T 8196 机械安全 防护装置 固定式和活动式防护装置的设计与制造一般要求
- GB/T 9969 工业产品使用说明书 总则
- GB/T 11022 高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求
- GB/T 16754 机械安全 急停功能 设计原则
- GB/T 17248.3 声学 机器和设备发射的噪声 采用近似环境修正测定工作位置和其他指定位置的发射声压级
- GB/T 18831 机械安全 与防护装置相关的联锁装置 设计和选择原则
- GB/T 19229.2 燃煤烟气干法/半干法脱硫设备
- GB/T 19670 机械安全 防止意外启动
- GB/T 21833.2 奥氏体-铁素体型双相不锈钢无缝钢管 第2部分：流体输送用管
- GB/T 25295 电气设备安全设计导则
- GB/T 27977 水泥生产电能能效测试及计算方法
- GB/T 33009 工业自动化和控制系统网络安全 集散控制系统（DCS）
- GB/T 33863 OPC 统一架构
- 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/T 50087 工业企业噪声控制设计规范
- HJ 75 固定污染源烟气（SO₂、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范
- HJ 76 固定污染源烟气（SO₂、NO_x、颗粒物）排放连续监测系统技术要求及检测方法
- JB/T 4735.2 固体料仓
- JCJ/T 3 水泥机械设备安装工程施工及验收规范
- JC/T 402 水泥机械涂漆防锈技术条件
- JC/T 406 水泥机械包装技术条件
- JC/T 532 建材机械钢焊接件通用技术条件
- NB/T 47003.1 压力容器 第1部分：钢制焊接压力容器

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 复合脱硫系统 Hybrid flue gas desulfurization system

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 Desulfurization efficiency

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

C_2 —脱硫后烟囱排放口烟气中 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

脱硫剂消耗量与脱除 SO_2 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 ，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 ；

C_1 ——脱硫前烟气中 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)；

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

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

m_2 ——消耗水剂的质量 kg/h 。

4 适用条件与负荷设计依据

4.1 适用条件

a) 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 $1500\text{mg}/\text{Nm}^3$ ；

b) 处理烟气量不宜高于 100 万 Nm^3/h (干基)；

c) 适用 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。

4.2 新建项目脱硫工程的设计烟气量和 SO_2 浓度等烟气设计参数宜采用窑线满负荷生产时最大连续工况下的数据；改扩建项目脱硫工程的设计烟气量和 SO_2 浓度等烟气设计参数宜以实测值为基础并充分考虑波动范围后综合确定。

4.3 应根据工程设计需要收集烟气理化性质等原始资料，主要包括以下内容：

- a) 烟气量(正常值、最大值、最小值)；
- b) 烟气温度及变化范围(正常值、最大值、最小值及露点温度)；
- c) 烟气中相关气体成分(SO_2 、 O_2 、 CO 等)及浓度(正常值、最大值、最小值)；
- d) 原燃材料中硫的存在形态、含硫量及生料磨工作制度。

5 总体要求

5.1 一般规定

5.1.1 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。

5.1.2 脱硫工程的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。脱硫工程建设应按国家工程项目建设规定的程序进行。

5.1.3 脱硫工程的 SO_2 排放浓度应符合国家和地方排放标准的要求。

5.1.4 脱硫工程的设计应充分考虑燃料、原料及主体工程负荷的变化，提高脱硫工艺系统的适应性和可调节性。

5.1.5 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。

5.1.6 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。

5.1.7 脱硫工程的设计、建设和运行维护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。

5.2 工程构成

5.2.1 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。

5.2.2 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。

5.2.3 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。

5.2.4 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。

5.3 总平面布置

5.3.1 脱硫工程的布置应符合 GB 50187、GB 50016 及相应行业规范要求。

5.3.2 脱硫工程的总平面布置应遵循以下原则：

- a) 工艺布局合理，输送距离短捷；
- b) 交通运输便捷；
- c) 方便施工，有利于维护检修；
- d) 合理利用地形、地质条件；
- e) 充分利用厂内公用设施；
- f) 节约集约用地，工程量小，运行费用低；
- g) 符合环境保护、消防、劳动安全和职业卫生要求。

5.3.3 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。

5.3.4 管线布置

5.3.4.1 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。

5.3.4.2 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。

6 工艺设计

6.1 一般规定

6.1.1 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。

6.1.2 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。

6.1.3 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。

6.1.4 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。

6.1.5 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。

6.2 脱硫粉剂系统

6.2.1 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 80m³，储仓

应符合 JB/T 4735.2 的规定。

6.2.2 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。

6.2.3 脱硫粉剂给料装置宜采用螺旋喂料机，应符合 JB/T 11933 的规定。

6.2.4 脱硫粉剂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 0.1~10t/h。

6.2.5 脱硫粉剂用量与脱除 SO₂ 的质量比应在 0.1~1.0 之间。

6.3 脱硫水剂系统

6.3.1 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。

6.3.2 脱硫水剂储仓宜选用不锈钢材质常压容器，容积不小于 70m³，并符合 NB/T 47003.1 的规定。

6.3.3 液态水剂给料装置宜选用多级离心泵，推荐计量范围为 0.3~3m³/h，离心泵应符合 GB/T 5656 的规定。

6.3.4 每列预热器喷枪数量不宜少于 4 支，喷枪插入点应选择在撒料点下方，避免直接将脱硫水剂喷射到生料粉上。

6.3.5 脱硫水剂最佳反应温度范围为 400℃~600℃，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。

6.3.6 脱硫水剂用量与脱除 SO₂ 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 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%。

6.4 电气及控制系统

6.4.1 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 SO₂ 与 O₂ 环保检测数据。

6.4.2 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。

6.4.3 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。

6.4.4 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。

6.4.5 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。

7 主要工艺设备和材料

7.1 主要工艺设备

7.1.1 钢结构应符合 GB 50205 的规定。

7.1.2 楼梯平台应符合 GB 4053 的规定。

7.1.3 焊接件应符合 JC/T 532 的规定。

7.1.4 机械涂漆防锈应符合 JC/T 402 的规定。

7.1.5 设备及其部件的包装、运输、发运应符合 JC/T 406 的规定。

7.1.6 电气及自动化设备的配电与控制应符合 GB 50295 的规定。

7.1.7 电气设备接地装置应符合 GB/T 5226.1 的规定。

7.1.8 电动机能效等级应符合 GB 18613—2020 表 1 中的 2 级规定。

7.1.9 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。

7.1.10 系统通信模式宜采用光纤网络通信模式。

7.2 材料

7.2.1 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。

7.2.2 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。

7.2.3 钢制设备所用的钢材应符合 GB912 的规定。

7.2.4 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。

7.2.5 保温油漆的设计宜参照 DL/T5072 的要求。

8 安全环保

8.1 安全

8.1.1 脱硫系统机械电气安全应符合 GB/T 5226.1 的规定。

8.1.2 脱硫系统直梯、斜梯、防护栏杆和工作平台应符合 GB 4053 的有关规定。

8.1.3 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。

8.1.4 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。

8.1.5 脱硫系统应设置安全警示标志，应符合 GB 2894 的规定。

8.1.6 脱硫系统应设置联锁装置，应符合 GB/T 18831 的规定。

8.1.7 脱硫系统应设置急停装置，应符合 GB/T 16754 的规定。

8.2 环保

8.2.1 脱硫系统工作位置噪声控制应符合 GB/T 50087 的规定。

8.2.2 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。

9 安装验收、调试

9.1 安装验收

9.1.1 脱硫系统成套设备安装工程施工及验收应符合 JCJ/T 3 的规定。

9.1.2 脱硫系统成套装备在交付前应进行安装验收和性能试验。

9.1.3 脱硫系统成套装备投产前，应进行单机试车、无负荷联动试车和负荷试车等调试。

9.1.4 脱硫系统调试结束后，应进行性能考核测试。

9.2 调试内容

9.2.1 调试前的准备工作

脱硫系统调试前应进行以下准备：

- a) 资料准备；
- b) 调试人员应配备工艺、设备和电气等专业技术人员以及生产操作人员；
- c) 现场危险及预防，根据设备特点识别相关危险源，并制定相关的紧急预案；
- d) 制定调试计划，调试计划应满足本标准要求，现场工程进度以及调试工作的技术要求。调试计划包括调试目的、进度计划、人员组织与协调、培训计划、原料准备计划、单机试车计划、无负荷联动试车计划、负荷试车计划和调试备件计划等。

9.2.2 单机试车

各单机设备的空运转试验应符合相关单机设备标准的规定。单机试车应保证各单机设备的润滑系统、控制系统以及温度、压力检测设备等运转正常，否则应进行必要的调整。单机试车检查宜包括：

- a) 检查电机旋转方向是否正确；
- b) 检查阀门开关是否正确；
- c) 检查仪表信号是否正确；
- d) 检查水源、气源压力和流量是否正确。

9.2.3 无负荷联动试车

应在完成单机试车的基础上开展无负荷联动试车。无负荷联动试车宜包括：

- a) 检查设备分组情况是否满足工艺要求；
- b) 检验设备组起和组停顺序是否满足要求；
- c) 检验设备开停机间隔时间是否满足工艺要求；
- d) 检验设备工艺联锁条件是否合理；
- e) 检验设备安全联锁是否满足工艺要求；
- f) 检验系统工艺参数（如温度、风量、风压等）是否满足负荷试车条件等。

9.2.4 负荷试车

负荷试车要求如下：

- a) 脱硫系统负荷试车应在所有设备已通过无负荷试车且运转合格，供、配电及其连锁和控制调节系统能正常使用，各种原材料的储备及质量满足负荷试车的需要的前提下进行；
- b) 负荷试车应遵循安全优先、质量优先、循序渐进等原则；
- c) 应根据脱硫系统规模及设计情况确定负荷方案，逐渐提高系统负荷至 100%，稳定运行；
- d) 脱硫系统的验收试车应满足性能要求的规定。

10 性能测试

10.1 测试仪器

测试仪器及精度要求应满足相关测试标准的要求。

10.2 测试范围

性能测试考核范围为整套脱硫系统。如有特殊要求，需重新界定性能测试范围。

10.3 测试条件

10.3.1 测试中使用的温度、压力、烟尘浓度等测试仪器和仪表均应符合 GB/T 26282 规定的精度要求。

10.3.2 计量设备经过校验和校准，并记录。

10.3.3 各专业考核人员已到位，应根据性能测试内容准备相应的记录表格。

10.4 测试要求

10.4.1 脱硫系统的测试方法应符合 GB 21508 的规定。

10.4.2 电能能效测试应符合 GB/T 27977 的规定。

10.5 测试内容

脱硫系统性能测试内容、方法、频率应符合表 1 的规定。

表1 脱硫系统性能测试内容、方法、频率

序号	测试内容	单位	测试方法	24小时测试频率
1	本底SO ₂ 浓度	mg/Nm ³	GB 4915	连续测量
2	排口SO ₂ 浓度	mg/Nm ³	GB 4915/HJ75/HJ76	连续测量
3	脱硫效率	%	按照3.2规定	连续测量
4	脱硫剂与脱硫质量比	kg/kg	按照3.3规定	连续测量
5	电耗	kW·h/t.cel	GB 21508	连续测量
6	噪声	dB	GB/T 17248.3	3次

11 运行与维护

11.1 一般规定

11.1.1 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。

11.1.2 脱硫工程的运行应根据燃料、原料及主体工程负荷的变化及时调整，保证 SO₂ 连续稳定达标排放。

11.1.3 脱硫工程运行应在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。

11.1.4 主体工程启停机时应安排脱硫工程先开后停。

11.1.5 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。

11.2 特殊要求

11.2.1 脱硫剂用量的调整应以稳定达标为前提，并兼顾经济性原则，避免过量使用造成脱硫剂浪费与逃逸。

11.2.2 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。

11.2.3 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。

11.2.4 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 SO₂ 波动。

11.2.5 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。

12 交货文件

12.1 系统中各种设备的使用说明书应符合 GB/T 9969 的规定。

12.2 应在合同规定期限内，按照合同要求，提供系统装备的安装说明书和安装图纸、产品使用说明书及调试说明书、电气控制系统使用说明书等文件，用于指导系统装备的正确安装、合理使用及优化操作。

参 考 文 献

[1] GB/T 33652 水泥制造能耗测试技术规程

[2]
