ICS 13.020.40
CCS Z 05

团　　体　　标　　准

T/CSES 83—2023

水泥工业大气污染防治技术导则

Technical guidelines on air pollution prevention and control for cement industry

（发布稿）

2023-1-4 发布　　2023-1-4 实施

中国环境科学学会　　发布

全国团体标准信息平台

全国团体标准信息平台

目　　次

前　言 II
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 生产工艺与大气污染物排放特征 2
5 污染预防技术 4
6 污染治理技术 6
7 环境管理措施 12
8 污染防治可行技术路线 14
附录 A（资料性）典型新型干法水泥生产工艺流程及主要产污节点 17

全国团体标准信息平台

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。

本文件由中国环境科学学会提出并归口。

本文件起草单位：建筑材料工业技术情报研究所、中国科学院工程热物理研究所、天津朝阳环保科技集团有限公司、安徽元琛环保科技股份有限公司、华新水泥股份有限公司、华润水泥技术研发（广西）有限公司、南京工业大学、西安龙净环保科技有限公司、上海万澄环保科技有限公司、杭州特盈能源技术发展有限公司、湖州市菱湖三狮水泥有限公司、绍兴柯桥第三水泥有限公司、惠净环保（天津）有限公司、安徽海螺集团有限责任公司、天津水泥工业设计研究院有限公司、建筑材料工业技术监督研究中心、中国环境科学研究院、生态环境部华南环境科学研究所、生态环境部环境工程评估中心、北京市化工职业病防治院。

本文件主要起草人：王新春、王宗爽、任强强、杨久俊、陈志、杨宏兵、陶从喜、谭玉菲、苏航、沈岳松、雷华、施小烽、邓国亮、方立敏、王雪铨、李艳玲、胡芝娟、陈永波、陆鹏、许红霞、王新频、吴铁军、林敏燕、赵婷婷、王陆阳。

全国团体标准信息平台

水泥工业大气污染防治技术导则

1 范围

本文件提出了水泥工业企业大气污染防治可行技术。

本文件适用于新型干法水泥工业企业选择大气污染物深度减排可行技术。

本文件可作为新型干法水泥工业企业新建、扩建和改建项目的环境影响评价、环境保护设施工程设计、施工、验收和运行管理以及环境监理、地方大气污染物排放标准制修订的参考。

硫铝酸盐水泥等特种水泥生产企业、独立水泥粉磨站和独立矿渣粉生产企业深度减排技术改造可参照本文件。

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 4915　水泥工业大气污染物排放标准

GB/T 6719　袋式除尘器技术要求

GB/T 16911　水泥生产防尘技术规范

GB 17691　重型柴油车污染物排放限值及测量方法

GB/T 27869　电袋复合除尘器

GB 30485　水泥窑协同处置固体废物污染控制标准

GB 50295　水泥工厂设计规范

GB 50577　水泥工厂职业安全卫生设计规范

GB 51045　水泥工厂脱硝工程技术规范

HJ 75　固定污染源烟气（SO_2、NO_x和颗粒物）排放连续监测技术规范

HJ 179　石灰石/石灰－石膏湿法烟气脱硫工程通用技术规范

HJ/T 256　建设项目竣工环境保护验收技术规范 水泥工业

HJ/T 324　环境保护产品技术要求 袋式除尘器用滤料

HJ/T 397　固定源废气监测技术规范

HJ 462　工业锅炉及炉窑湿法烟气脱硫工程技术规范

HJ 630　环境监测质量管理技术导则

HJ847　排污许可证申请与核发技术规范 水泥工业

JB/T 5910　电除尘器

《污染源自动监控管理办法》（国家环境保护总局令 第28号）

3 术语和定义

GB 4915、GB 30485以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

污染防治可行技术 available techniques of pollution prevention and control

根据我国一定时期内环境需求和经济水平，在污染防治过程中综合采用污染预防技术、污染治理技术和环境管理措施，使污染物排放同时稳定达到阶段性深度减排限值要求、规模应用的技术。

3.2

吨熟料氨水用量 ammonia consumption per unit of product of clinker

在统计报告期内，水泥熟料生产线脱硝系统以氨水质量浓度 20%计的氨水用量（kg）与水泥熟料产量（t）的比值，用 kg/t 熟料表示。

3.3

氨逃逸浓度 ammonia slip

脱硝系统运行时，烟气中氨的质量与烟气体积之比，按照 10%基准含氧量折标，用 mg/m^3 表示。

3.4

窑尾烟室 kiln inlet chamber

水泥窑分解炉底部与回转窑尾端（物料入口端）之间的衔接空间。

3.5

封闭 closed

利用完整的围护结构将物料、作业场所等与周围空间阻隔的状态或作业方式，设置的门窗、盖板、检修口等配套设施在非必要时应关闭。

3.6

密闭 airtight

物料不与环境空气接触，或通过密封材料、密封设备与环境空气隔离的状态或作业方式。

3.7

标准状态 standard state

温度为 273K，压力为 1.01×10^5 Pa 时的状态，简称“标态”。本文件涉及的大气污染物浓度值均为标态下的干烟气浓度。窑尾及余热系统排放口大气污染物浓度按照含氧量 10%进行折标，物料烘干用独立热源排放口大气污染物排放浓度按照含氧量 18%进行折标，其他排放口大气污染物排放浓度不进行折标处理。

4 生产工艺与大气污染物排放特征

4.1 生产工艺

4.1.1 工艺环节

新型干法水泥工艺通常包括矿山开采和原燃料处理（原料/燃料破碎、原料/燃料预均化）、生料及燃料制备（原料配料、生料粉磨、煤粉制备）、烧成（生料均化及窑尾喂料、生料预热分解、回转窑煅烧、熟料冷却）、水泥粉磨（水泥配料、水泥粉磨）和水泥及熟料储运出厂（成品储存、水泥包装、散装装运、成品出厂）等。窑头和窑尾排气筒是水泥厂大气污染物主要排放口，其他排气筒属一般排放口，典型新型干法水泥生产工艺流程及主要产排污节点参见附录 A。

4.1.2 工艺特征

4.1.2.1 分解炉正常生产工作温度范围为 850℃～1000℃，烟气中 O_2 浓度、CO 浓度会影响分解炉脱硫脱硝效果。

4.1.2.2 余热利用系统对烟气起降温作用，增湿塔对烟气起调质作用。

4.1.2.3 生料磨运行或停运，会改变窑尾烟气湿度、温度和污染物浓度等性质。

4.1.2.4 窑尾排气筒及窑尾烟气余热利用系统烟气含氧量一般不超过 10%，采用独立热源的立磨系统排气筒烟气含氧量一般在 15.0%～20.2%，窑头排气筒烟气和其他一般排放口废气含氧量与大气含氧量相近。

4.2 大气污染物来源和排放特征

4.2.1 颗粒物

4.2.1.1 有组织排放特征

4.2.1.1.1 有组织排放口主要包括窑尾、窑头、煤磨、水泥磨、破碎机和包装机排气筒。

4.2.1.1.2 窑头颗粒物主要来源于熟料粉尘，黏性小，初始浓度一般为 2 g/m^3～30 g/m^3。

4.2.1.1.3 窑尾颗粒物主要来源于预热器系统出口和生料磨。在生料磨停运阶段，预热器系统出口烟气呈碱性，黏性大，粒径小于 15 μm 的颗粒约占 95%，颗粒物浓度可达 20 g/m^3。在生料磨运行阶段，颗粒物浓度可达 100 g/m^3。

4.2.1.2.4 煤磨系统产生的颗粒物主要来源于煤粉制备和烘干热风。

4.2.1.2.5 水泥磨产生的颗粒物主要来源于气体中夹带的水泥粉尘，粒径小于 10 μm 的颗粒物占 80%以上，水泥磨出口颗粒物浓度可高达 1000 g/m^3。

4.2.1.2.6 破碎机产生的颗粒物主要来源于破碎过程中产生的物料扬尘，需采用密闭空间和进行负压操作，防止粉尘外溢。

4.2.1.2.7 有独立热源的立磨系统产生的颗粒物主要来源于物料粉磨和选粉过程，集尘器既是生产设备也是颗粒物治理设备。

4.2.1.2.8 包装机产生的颗粒物主要来源于常温水泥尘，主要采取密封空间、收集罩和袋式除尘器。

4.2.1.2 无组织排放特征

4.2.1.2.1 水泥生产过程逸散性颗粒物主要来源于采矿、原燃料输送、倒运、上料、卸料、水泥包装和出厂等工序，主要来源如下：

a）采矿阶段的矿石开采、倒运、堆放、装卸、运输工序和裸露地等。

b）钙质原料、硅质原料、校正原料等熟料原料水泥混合材进厂卸料、堆取料和输送等环节。

c）原煤进厂卸料、预均化堆取料、倒运输送等环节。

d）熟料卸料、输送和散装等环节。

e）水泥输送、储存包装、散装和装车发运等环节。

4.2.2 二氧化硫

4.2.2.1 窑尾烟气 SO_2 主要来源于原辅料和燃料中的无机硫和挥发性有机硫。

4.2.2.2 生料磨运行和停运状态影响窑尾烟气 SO_2 浓度。

a） 在生料磨停运阶段，烟气不经过生料磨，直接进入烟气处理设施后经烟囱排放。生料磨停磨之时，烟气温度从约 90℃上升到约 130℃，窑尾 SO_2 排放浓度瞬间增大，易造成超标。

b） 在生料磨运行阶段，SO_2 经生料磨后部分被生料吸收，回到窑的烧成带，以硫酸盐的形式固定在水泥熟料中。SO_2 的吸收率随单位生料 SO_2 含量的增大而减小，受原料湿含量、磨内温度、停留时间等因素影响较大，吸收率一般为 40%～80%。

4.2.2.3 采用独立热源的立磨系统产生的 SO_2 来源于燃料，实测浓度一般不超过 35 mg/m^3。

4.2.3 氮氧化物

4.2.3.1 窑尾烟气 NO_x 产生于回转窑和分解炉。

4.2.3.2 回转窑内 NO_x 产生量约占水泥窑系统 NO_x 产生量的 80%，窑尾烟室 NO_x 浓度可达 900 mg/m^3～1100 mg/m^3。

4.2.3.3 分解炉内 NO_x 产生量约占水泥炉窑 NO_x 产生量的 20%，分解炉可进行分煤、分风和分料操作的分级燃烧改造，对 NO_x 有部分脱除效果。

4.2.3.4 采用独立热源的立磨系统产生的 NO_x 来源于燃料燃烧，其中，采用清洁燃气的立磨系统烟气 NO_x 主要以热力型为主，实测浓度一般不超过 20 mg/m^3，生物质热风炉烟气 NO_x 主要以燃料型为主，实测浓度一般不超过 100 mg/m^3。

4.2.4 氨

4.2.4.1 水泥窑系统烟气氨排放包括本底氨排放和氨逃逸。

a） 本底氨排放是指正常生产过程中烟气中的氨，主要产生于原料和协同处置废物。

b） 氨逃逸是指脱硝过程投入的氨基还原剂未经反应随烟气排放，产生氨逃逸的主要原因包括氨水使用过量、喷氨枪布置位置不合理、喷氨流量分布不均、SCR 催化剂堵塞、雾化风量偏小等。

5 污染预防技术

5.1 一般原则

5.1.1 应优先采用低硫生料，并选用符合国家或地方相关标准及政策要求的低硫燃料，降低 SO_2 初始浓度。

5.1.2 宜优先选用低氨基物质的原燃料，稳定生产工况，应采用低氮燃烧技术、分级燃烧技术降低 NO_x 产生，减低氨用量。

5.1.3 低氮燃烧和分级燃烧设备应定期维护、保养，以确保其运行稳定。

5.1.4 生料磨运转率应不低于 80%。

5.1.5 采用的污染预防技术装置应符合国家和地方规定的有关安全要求。

5.2 颗粒物逸散预防技术

5.2.1 在条件允许情况下，优先采用废气收集设施和治理设备，把无组织排放变为有组织排放。次之采用封闭、密闭、抑尘等有效防治颗粒物逸散措施。

5.2.2 破碎、筛分、混合、粉磨、包装等易扬尘作业工段，宜对生产设备进行整体封闭或半封闭结合橡胶软帘封闭。

5.2.3 厂区道路进行硬化并设洒水抑尘设施，汽运车辆采用车厢封闭、全覆盖和限速等防尘和抑尘措施，矿山外运出口和厂区料场出口设置洗车台。及时清扫道路的泥土和其他杂物。

5.2.4 针对裸露地面因地制宜采取绿化、硬化、覆盖、洒水等防尘和抑尘措施。

5.3 原料控硫技术

5.3.1 宜控制生料中 SO_3 的含量不大于 0.5%。

5.3.2 根据窑尾排放限值要求，在石灰石矿山勘探、开采和预均化阶段进行硫控制。根据每个矿的实际情况进行选料，对于部分石灰石含硫量大于 0.5%的矿山，宜合理搭配不同硫含量的原料，并采用智能化采选。

5.4 低氮燃烧技术

采用低氮燃烧器，降低一次空气比例，使煤粉分级燃烧，或利用助燃空气的压头，把部分燃烧烟气吸回与空气混合燃烧，降低燃烧温度，减少热力型 NO_x 产生，NO_x 产生量可降低约 3%～10%。

5.5 分级燃烧技术

5.5.1 分解炉分级燃烧

5.5.1.1 该技术原理为在分解炉锥部建立脱硝还原燃烧区，将原分解炉用煤的一部分均布于此区域，使其缺氧燃烧以产生还原剂。在缺氧条件下抑制燃料型 NO_x 的生成，同时还原剂将烟气中的 NO_x 还原为 N_2，从而实现 NO_x 减排。

5.5.1.2 分解炉分级燃烧技术在不影响产品产量和质量的条件下，分解炉出口 NO_x 可以稳定降至 300 mg/m^3～500 mg/m^3，脱硝效率一般为 25%～60%。

5.5.1.3 对于分级燃烧改造项目，应注意：

a） 煤粉宜多个入口进入分解炉。

b） 宜充分考虑分解炉锥部的断面热负荷，优化燃烧器位置、旋转角度和煤粉量大小参数，避免还原区温度过高造成结皮。

c） 对窑尾烟室缩口、上升烟道及分解炉锥部进行整形改造的，上升烟道及锥部宜采用

方变圆结构，并延长上升气流的路径，控制截面风速，避免塌料、串料入窑。

5.5.2 带脱硝炉的分级燃烧

5.5.2.1 在原有窑尾烟室和分解炉之间增加烟气脱硝炉，将原分解炉用煤量的 30%～100%直接喂入脱硝炉中，煤粉经气化和不完全燃烧，产生的 CO 浓度不高于 5%，形成强还原气氛，将窑内产生的 NO_x 完全还原为 N_2，可将分解炉出口 NO_x 浓度稳定控制在 400 mg/m^3 以下，对窑系统的总体脱硝效率可达 70%。

5.5.2.2 脱硝炉装置同时对原分解炉进行分料，控制还原区温度，并有节煤和节电效果，不增加运行成本，吨熟料可节约燃料 1 kg～5 kg 标准煤。

5.5.3 带热碳催化还原的分级燃烧

在分解炉内形成还原燃烧区，以热碳和 CO 为还原剂将水泥窑内产生的 NO_x 部分反应生成 N_2 和 CO_2，使用无机复合粉料催化剂增加脱硝反应效率。

5.5.4 带原位还原炉的分级燃烧

在分解炉外设置煤粉流态化原位还原炉，在原分解炉用煤量的 20%～100%范围内，煤粉在原位还原炉内挥发分氮和部分焦炭氮定向转化为 N_2，减少燃料型 NO_x 排放；煤粉在还原炉内产生高温半焦和煤气，组成高温气固二元还原剂进入分解炉内燃烧，为水泥生料分解提供热量的同时，把窑内的 NO_x 还原为 N_2，脱硝效率可达 70%，也称为“原位-二元低氮技术”。

5.5.5 采用垃圾衍生燃料的分级燃烧

5.5.5.1 垃圾衍生燃料（Refuse Derived Fuel，简称 RDF）是通过对可燃性垃圾进行破碎、分选、干燥、添加药剂、压缩成型等处理而制成的燃料。

5.5.5.2 将垃圾衍生燃料喂入分解炉底部，RDF 在分解炉底部燃烧裂解产生的 CO、氨基-NH_2 和甲基-CH_3 等还原性中间产物还原 NO_x 为 N_2。可与 SNCR 脱硝技术配合使用，水泥窑的热量替代率（TSR）可达到 15%以上，可协同降低 NO_x 和 CO_2 排放。

6 污染治理技术

6.1 一般原则

6.1.1 优先采用污染预防技术，并有效控制污染防治技术产生的二次污染，大气污染排放满足 GB 4915 和 GB 30485 相关要求。

6.1.2 防尘设计和技术改造宜满足 GB/T 16911 相关要求，宜采用袋式除尘技术实现颗粒物深度减排。

6.1.3 SO_2 排放控制宜优先采用生产过程脱硫技术，若不能实现深度减排要求，宜主要根据 SO_2 初始浓度选择适宜的脱硫技术。

6.1.4 NO_x 排放控制应优先采用低氮燃烧技术和分级燃烧技术，并根据 NO_x 排放限值、氨逃逸和吨氨水消耗量要求，结合初始投资和运行成本等因素选择适宜的脱硝技术。除满足本文

件要求外，脱硝工程还应符合 GB 51045 的相关要求。

6.1.5 SNCR 反应窗口温度在 850℃～1050℃之间，控制合理的氨氮摩尔比及氧化气氛，喷氨后确保还原剂在反应区停留时间在 1.8 s～2.5 s。

6.1.6 采用的污染治理技术装置应符合国家和地方规定的有关安全要求。

6.2 颗粒物治理技术

6.2.1 袋式除尘技术适用于捕集窑头、窑尾、煤磨、矿渣立磨、水泥磨和其他排放口粒径大于 0.3 μm 的细小颗粒物，烟气温度应不高于 250℃。除尘效率可达 99.9%～99.99%。

6.2.2 应根据不同工况的烟气特点选择袋式除尘器的滤料种类、过滤风速和清灰方式。袋式除尘器安装投运之前，应通过计算模拟进行空间流场分析，确定过滤风速、清灰周期等关键技术参数，不同排放口袋式除尘器常用滤料的性能参数参见表 1。

a） 常用滤料主要包括芳纶针刺毡、聚酰亚胺针刺毡、玻璃纤维机织布、涤纶针刺毡、丙烯腈均聚体（又名亚克力）针刺毡。

——芳纶针刺毡滤料的适用温度范围为 200℃以下，优点是具有耐磨性、耐碱性和耐温性能好的特点，缺点是成本较高。

——聚酰亚胺针刺毡持续使用温度不高于 260℃，瞬时使用温度可达 280℃，具有阻燃、耐温的特点，缺点是不耐水解。

——玻璃纤维机织布滤料的持续使用温度不高于 260℃，瞬时使用温度可达 280℃，具有耐腐蚀、尺寸稳定、拉伸断裂强度高的优点，缺点为抗折性差。

——涤纶针刺毡滤料的适用温度范围为 130℃至常温，具有防水防静电的特点，缺点是不耐强碱。

——丙烯腈均聚体（亚克力）针刺毡的持续使用温度不高于 125℃，瞬时使用温度可达 140℃，抗酸性、抗水解性好，耐腐蚀，缺点为耐碱性能一般。

b）为满足颗粒物排放浓度不超过 10 mg/m^3 的限值要求，除聚酰亚胺针刺毡外，其他滤料宜采用覆膜或超细纤维梯度滤料。

——覆膜滤料是以机织滤料或针刺毡滤料为基底，在其表面覆上一层经过双向拉伸制作成微孔聚四氟乙烯（PTFE）薄膜。

——滤料覆膜后形成以表面过滤为主，疏油、疏水，具有运行阻力小、除尘效率高、易清灰的特点。

c） 过滤风速应随颗粒物排放限值及运行阻力的降低而降低。为满足颗粒物排放浓度不超过 10 mg/m^3 的限值要求，过滤风速应不超过 0.8 m/min。

d）主要采用脉冲式和反吹式方式。

——脉冲式清灰需要压缩空气作为清灰动力，适用于针刺毡，清灰强度高，清灰时间短，应用范围广。

——反吹式清灰利用反吹风机的反向气流使滤袋上颗粒物脱落，适用于玻纤机织物滤料。

e） 清灰周期根据系统阻力情况、时间和颗粒物性质确定，通常采用定阻清灰、定时清灰和离线清灰方式。

——优先采用定阻清灰方式，清灰操作的系统阻力设定在 500 Pa～1200 Pa。

——定时清灰方式的清灰周期见表 1。

表 1 各排放口袋式除尘器性能参数的选型参考

排放口	常用滤料	清灰方式	清灰周期	其他注意事项
窑头	芳纶超细纤维梯度滤料或覆膜芳纶针刺毡或覆膜玻璃纤维机织布	脉冲式	30 min～50 min	采用烟气余热回收，以满足袋式除尘器正常运行对温度范围的要求。
窑尾	覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡	反吹风式/脉冲式	30 min～50 min	采用烟气余热回收，以满足袋式除尘器正常运行对温度范围的要求。
煤磨	三防（防油、防水、防静电）覆膜涤纶针刺毡	脉冲式	4 min～8 min	应增加防燃烧、防积尘、卸压、灭火、温度和 CO 浓度检测等技术措施。
水泥磨	覆膜涤纶针刺毡或覆膜丙烯腈聚合体（亚克力）针刺毡	脉冲式	2 min～8 min	—
带独立热源的立磨	覆膜丙烯腈聚合体（亚克力）针刺毡	脉冲式	30 min～50 min	—
其他排放口	覆膜涤纶针刺毡	脉冲式	30 min～50 min	—

6.2.3 为防止安装过程中滤袋破损，滤袋和袋笼的安装应注意：

a） 安装前，检查是否有破损，所有滤袋接缝应朝同一方向，背对进气口。

b） 安装过程中，每排滤袋的上方安装一根喷吹管，每根喷吹管通过钢接头与分气箱相连，喷吹管的另一端有可供调节的固定端与净气室（上箱体）的支架连接，喷吹管的各喷吹口应与滤袋的中心保持对中。压边圈、袋笼、滤袋、花板四部件中心应一致，尺寸偏差不大于 2 mm。

c） 安装完毕后，滤袋和袋笼应进行适当调整和检查，保证滤袋之间不接触，相邻滤袋外表面间距不小于 25 mm。

d） 除尘器投运前，应对滤袋先进行荧光粉试验，必要时可进行两次不同颜色的荧光粉试验，检测除尘器的气密性。荧光粉试验后再进行预涂灰处理。

6.2.4 袋式除尘器应符合 HJ/T 324 和 GB/T 6719 的相关要求。

6.2.5 在包装操作区除尘吸风口的设置应保证操作工人处于尘源的上风向，确保风量充足，并确保高效补集。

6.3 二氧化硫治理技术

6.3.1 干法脱硫

6.3.1.1 将分解炉热生料或 CaO、$Ca(OH)_2$ 等脱硫剂随入窑生料一起喂入预热器一级和二级旋风筒之间的连接风管，烟气温度在 400℃～600℃，发生脱硫反应。主要包括干反应剂喷注法技术和热生料喷注法技术。

a） 干反应剂喷注法技术采用熟石灰作为脱硫剂，在钙硫摩尔比为 2.5 和 4 时，脱硫效

率可分别达到 50%和 70%。当同时将熟石灰喷入生料磨时，脱硫效率可高达 80%。

b） 热生料喷注法技术采用分解炉热生料作为脱硫剂。从分解炉出口引出 5%～10%废气进入旋风收尘器，将收集的粉尘经消化喂入一、二级旋风筒之间的连接风管。热生料含活性 CaO，当 SO_2 本底浓度低于 600 mg/m^3，钙硫摩尔比 2：1 时，脱硫效率可达 30%。

6.3.1.2 干反应剂喷注法通常适用于 SO_2 初始浓度低于 800 mg/m^3 时，SO_2 排放浓度可低于 35 mg/m^3。

6.3.2 石灰石/石灰—石膏湿法脱硫

6.3.2.1 石灰石/石灰—石膏湿法脱硫工艺过程是经除尘器的烟气通过进口挡板引入窑尾引风机，经由吸收塔下部，烟气与石灰石浆液逆向流动脱除 SO_2，脱硫温度小于 160℃。脱硫塔之后布置高效除雾器或湿式电除尘，去除潮湿废气中的颗粒物，并可协同脱除氯化氢以及部分氟化物。

6.3.2.2 石灰石/石灰—石膏湿法脱硫技术通常适合于窑尾烟气 SO_2 初始浓度高于 800 mg/m^3，吸收塔入口颗粒物浓度不大于 50 mg/m^3 的烟气。SO_2 脱除率可达 95%以上，出口 SO_2 排放浓度可控制在 35 mg/m^3 以下，颗粒物浓度可控制在 10 mg/m^3 以下。

6.3.2.3 宜控制脱硫剂的纯度和细度。保证 $CaCO_3$ 质量分数在 90%以上，控制粒度为 200 目～400 目（31 孔/cm^2～62 孔/cm^2），筛下的 $CaCO_3$ 质量占石灰石总质量的 95%以上。一般采用水泥生料粉，而采用生料粉磨系统单独制备石灰石粉时，石灰石粉细度宜为 80 μm 方孔筛筛余≤16%。

6.3.2.4 可通过如下手段控制脱硫效率：

a）控制吸收塔浆液的 pH 值范围为 5.2～5.8，浆液质量浓度范围为 1100 kg/m^3～1250 kg/m^3，$CaCO_3$ 的质量分数范围为 15%～20%。

b）保障烟气在吸收塔内部的停留时间。使用空塔脱硫时，空塔气速宜控制在 2 m/s～4 m/s，烟气在塔内的停留时间为 1.5 s～4.5 s。

6.3.2.5 脱硫副产物为脱硫石膏，主要组分为二水硫酸钙晶体（$CaSO_4$•$2H_2O$）。为保证脱硫石膏品质，宜控制浆液中 $CaSO_4$ 的过饱和度在 1.25～1.30，浆液温度在 60℃以下，同时应控制合适的浆液搅拌强度、石膏排出时间和杂质含量。

6.3.2.6 石灰石—石膏湿法脱硫系统应符合 HJ 179 和 HJ 462 相关规定。

6.3.3 复合脱硫技术

6.3.3.1 复合脱硫技术采用脱硫粉剂和脱硫水剂，脱硫粉剂含有催化剂、矿化剂和钙基脱硫剂，脱硫水剂含有脱硫剂、催化剂和水。

6.3.3.2 脱硫粉剂在旋风筒内与生料混合均匀，脱硫剂中的强氧化剂将 SO_2 氧化为 SO_3，在催化组分作用下，SO_3 与钙基组分反应生成 $CaSO_4$，脱硫效率可达 80%。

6.3.3.3 脱硫水剂通过在上升风管处雾化喷入，与烟气的 SO_x 气体接触和反应，并部分吸附于生料颗粒表面，与碳酸钙反应，实现快速、高效地二次捕获逃逸的 SO_2。

6.3.3.4 复合脱硫技术通常适用于 SO_2 初始浓度低于 800 mg/m^3。投资成本较低，30 min 以内 SO_2 排放浓度可降低至 20 mg/m^3 以下。

6.3.3.5 宜采用无氨基材料；慎用脱硫水剂，以防后续袋式除尘器糊袋；关注 SO_3 排放，防

止产生二次污染问题。

6.4 氮氧化物治理技术

6.4.1 SNCR+SCR 技术

6.4.1.1 SCR 脱硝技术是在 180℃～350℃反应温度窗口范围内，氨水或尿素等氨基还原性物质与烟气混合，在催化剂作用下，将 NO_x 还原成为 N_2。SCR 脱硝系统一般与分解炉选择性非催化还原（SNCR）技术联合使用。

6.4.1.2 根据 SCR 反应系统的安装位置、温度窗口和颗粒物浓度，可分为高温高尘、高温中尘、高温低尘和中温中尘方式。

a）高温高尘 SCR 方式将 SCR 反应系统安装在预热器系统出口之后、余热利用系统之前，进入 SCR 反应装置的烟气温度范围为 280℃～350℃，颗粒物浓度范围 50 g/m^3～100 g/m^3。与其他 SCR 方式相比，具有系统阻力增加小、运行电耗低的特点，但因烟气含尘量高，易引起催化剂磨损、堵塞以及碱金属和重金属中毒等问题，故宜选择孔径较大的催化剂，再配备高频次的声波+耙式组合方式清灰。

b）高温中尘 SCR 方式将高温电除尘和 SCR 反应系统安装在窑尾预热器系统出口之后、余热利用系统之前，一电场或二电场高温电除尘作为脱硝反应装置预除尘设备，进入脱硝反应器的烟气温度范围为 280℃～350℃，颗粒物浓度可降低至 50 g/m^3 以下，与高温高尘 SCR 方式相比，催化剂磨损和堵塞问题得以缓解。宜采用超声波+耙式组合方式清灰。电除尘器其他主要设备、材料的性能和工艺参数应满足 JB/T 5910 的相关要求。

c）高温低尘 SCR 方式将除尘器和 SCR 反应系统安装在水泥窑预热器系统出口之后、余热利用系统之前，从预热器系统出口引出高温高尘烟气，经过喇叭口先进行旋风预收尘，然后进入高温电除尘器进行二级收尘，再经过高温金属滤袋进行三级收尘，在金属滤袋区净气室设置 SCR 脱硝反应器，进入脱硝反应器的烟气温度范围为 280℃～350℃，颗粒物浓度可降低至 10 mg/m^3 以下。与其他 SCR 方式相比，可解决催化剂磨损和堵塞问题，脱硝效率更高，但投资成本高。复合除尘器应符合 GB/T 27869 的相关要求。

d）中温中尘 SCR 方式将 SCR 反应系统安装在余热利用系统与高温风机之间或增湿塔出口后，进入脱硝反应器的烟气温度为 180℃～220℃，颗粒物浓度为 20 g/m^3～50 g/m^3。与其他 SCR 方式相比，具有布置灵活的特点，但脱硝效率较低，且应选用中低温催化剂。

6.4.1.3 V_2O_5-TiO_2 系蜂窝式催化剂的选择应注意：

a）在高钙粉尘工况下，碱/碱土金属氧化物会导致催化剂失活率加快，当 CaO 的含量超 30%时，催化剂用量宜增加 25%。

b） 在粉尘硬度较大的工况下，宜选择标准壁厚的催化剂提高运行的安全性，当粉尘中 SiO_2 和与 Al_2O_3 的含量比在 2:1 时，应注意催化剂内部通道因磨损造成的断裂风险。

c） 在中温工况下，对于烟气温度低于 250℃的中温工况 SCR 脱硝系统，应增加催化剂用量。

d） 当烟气中 SO_2、颗粒物碱金属和砷元素含量高时，易造成催化剂中毒，应选用抗中毒耐冲刷的催化剂。对于高砷煤，可在催化剂中加入 MoO_3，提高硬度的同时与 V_2O_5 构成复合型氧化物降低砷的毒化侵害。

6.4.1.4 在吨熟料氨水用量不超过 4.0 kg 以及氨逃逸不超过 8 mg/m^3 条件下，SNCR+SCR 技术可以稳定实现 NO_x 排放浓度不超过 50 mg/m^3。

6.4.2 脱硝炉+SNCR 技术

6.4.2.1 在采用窑尾烟气脱硝炉技术基础上，配套采用分解炉 SNCR 技术，在吨熟料氨水用量不超过 4.0 kg 以及氨逃逸不超过 8 mg/m^3 条件下，可稳定实现 NO_x 排放浓度不超过 50 mg/m^3。

6.4.2.2 对于技术改造项目，在设计、调试或生产过程中应注意：

a） 受现有分解炉框架及设施影响，设计时需重点考虑分解炉三次风管入口位置，脱硝炉出口位置及分解炉和三次风管的相互关系。

b） 注意新增脱硝炉与窑尾缩口的关系，全面考虑脱硝炉角度、煤粉入口位置和生料入库口位置等因素。

c） 如有条件，分解炉尽量避免偏心锥设计。

d） 生产操作时，应关注并控制脱硝炉温度，适当调整分煤量和分料量。

e） 窑尾、分解炉出口以及预热器系统出口都宜配置气体分析仪。

6.4.2.3 更适用于分解炉与窑炉能力偏小或配合不当，且原有窑尾烟室和分解炉之间有外加脱硝炉空间的情况。

6.4.3 热碳催化还原+SNCR 技术

6.4.3.1 技术改造需要增加的配置主要包括催化剂储存和计量输送系统、分煤、分风、分料系统、气氛与温度检测系统、现有 SNCR 喷氨装置改造、饱和蒸汽供给系统、脱硝中控系统配置。

6.4.3.2 关键控制参数包括：

a） 还原区内空气过剩系数小。

b） 吨熟料催化剂添加量范围为 0.2 kg～0.5 kg 之间。

c） NO_x 烟气在还原区内停留时间大于 1 s。

d） 还原区内温度范围在 800℃～1050℃。

6.4.3.3 与 SNCR 脱硝技术配合使用，在吨熟料氨水用量不超过 4.5 kg 以及氨逃逸不超过 8 mg/m^3 条件下，NO_x 排放浓度不超过 50 mg/m^3，且熟料产量质量不受影响。

6.4.3.4 更适用于分解炉与窑炉能力偏小或规模配合不当的情况，也适合高硫原料或硫铝酸盐水泥。

6.4.4 精准（智能）SNCR 技术

6.4.4.1 在 850℃～1100℃反应温度窗口范围内、无催化剂作用下，氨水或尿素等氨基还原性物质与烟气混合，将 NO_x 还原成为 N_2。采用氨水为还原剂的反应温度窗口为 850℃～1050℃，采用尿素为还原剂的反应窗口温度为 950℃～1100℃。

6.4.4.2 微量的 O_2 有利于 SNCR 反应的进行，O_2 浓度的上升使反应温度窗口向低温方向移动。分解炉的 O_2 浓度宜控制在 1.5%～2%。

6.4.4.3 可采用分层安装每根喷枪独立控制的喷枪组，实时监测生产工况的变化，通过数据驱

动控制模型等人工智能系统计算氨水需求量、压缩空气需求量和最佳喷氨位置，并通过曲线拟合，提前 3 min 预测 NO_x 排放浓度，从而及时调整氨水的喷射位置及喷射量。

6.4.4.4 在吨熟料氨水用量不超过 5.0 kg 以及氨逃逸不超过 8 mg/m^3 条件下，在 NO_x 初始浓度小于 450 mg/m^3 以下，可以稳定实现 NO_x 排放浓度不大于 100 mg/m^3。

6.4.5 原位—二元低氮+SNCR 技术

6.4.5.1 在工程设计、施工和运行过程中应注意：

a） 设计时需考虑还原炉出口与分解炉锥部之间压力平衡。

B） 在分解炉锥段高温气固二元燃料通入位置附近配置测温点，便于监测燃烧状态。

6.4.5.2 原位—二元低氮技术与 SNCR 脱硝技术配合使用，分解炉燃煤适应范围增大，可采用粗颗粒煤及劣质煤。

6.4.6 高温催化粉体+SNCR 技术

6.4.6.1 高温催化粉体催化剂是由铁元素为主的复合氧化剂、络合添加剂、有机化合物和少量水分配置成的催化粉体。该粉体对设备无腐蚀。

6.4.6.2 将催化粉体直接喷入分解炉或分解炉与最末级旋风筒的连接管道中，反应温度条件为 870℃～1100℃，反应停留时间大于 0.9 s，将烟气中的 NO_x 还原为 N_2。

6.4.6.3 与 SNCR 脱硝技术配合使用，脱硝效率一般可达到 60%，可在 NOx 排放浓度超过 100 mg/m^3 的紧急情况下使用，实际效果受粉体颗粒在烟气中的均匀性影响。

7 环境管理措施

7.1 环境管理制度

水泥企业应严格执行环境影响评价制度、环境监理制度和环境后评价制度、“三同时”制度、竣工环保验收制度和排污许可证管理制度等环境管理制度，并按照 HJ 847 等要求开展实施评估。

7.2 建设项目全过程管理措施

7.2.1 工艺设计阶段

7.2.1.1 应充分考虑原、燃料特点及生产工艺特点，设计先进、可靠的烟气、废气有害物治理系统，相关设计应满足 GB 50295 相关要求。

7.2.1.2 水泥工业企业应按照 HJ 630、HJ/T 397、HJ 75 等的相关要求，设计、建设并维护采样口、监测平台和排污口标志。

7.2.2 施工阶段

7.2.2.1 应注意施工阶段的扬尘治理，根据工程实际情况合理安排施工机械、运输车辆的停放、通行。

7.2.2.2 严格控制装料高度，应防止自卸汽车因装料过满而造成的沿路漏洒，渣土运输车辆应用篷布对车厢进行封实。对于车尾挡板变形漏缝的车辆要进行检修。

7.2.2.3 工程建设过程中，配套安全和职业卫生设施应同步建设，应在具有危险因素和职业病危害的场所设置醒目的安全标志、安全色、警示标志，职业安全卫生应符合 GB 50577 要求。

7.2.3 竣工验收阶段

7.2.3.1 厂区整洁，所有作业区域路面硬化，路面污泥污水清扫干净，水路、浆液管路通畅，统一规范厂内绿化。

7.2.3.2 大气污染物排放监测和评价应符合 HJ/T 256 要求，窑头窑尾等有组织排放排污口布设废气监测点位，现场勘测排气筒高度是否符合的相关要求。

7.2.3.3 水泥工业企业应按《污染源自动监控管理办法》等有关规定，安装、使用大气污染物排放自动监测设备，与生态环境主管部门联网，保证设备正常运行并依法公开排放信息。

7.2.4 运营维护阶段

7.2.4.1 水泥工业企业应按照相关法律法规、标准和技术规范等要求运行污染防治设施，并定期进行维护和管理，保证防治设施正常运行。

7.2.4.2 设备宜定期进行检修，并根据规定更换或维修必要部件，并做好维护保养记录。

7.3 无组织排放管理措施

7.3.1 一般原则

7.3.1.1 在规划制定无组织排放综合防治方案前，应清查逸散性颗粒物污染源，明晰所在工序、点位、数量和活动水平，在保证人员安全和生产安全条件下，规划、设计、建设和实施无组织排放综合防治措施。

7.3.1.2 保持厂区整洁有序，定期对厂区道路、车间、设备、设施和裸露地进行巡视、检查和维护，确保设备设施正常运转，及时发现无组织排放源和采取有针对性的治理措施。

7.3.1.3 所有物料转移、运输全部宜采用全封闭胶带机、封闭通廊、管状带式输送机和密闭车厢、真空罐车、气力输送等输送方式进行运输。

7.3.1.4 若无法实现管道输送、气力输送，仍需采用车辆输送方式，运输道路需硬化，并配备高效机扫车、吸尘车、洒水车，进出厂道路安装车轮清洗装置，物料运输车辆采用新能源车辆或符合 GB 17691 国五及以上排放标准（含燃气）的车辆。

7.3.2 矿区

7.3.2.1 使用自带收尘设施的钻机，爆破期间合理使用爆破抑尘车。

7.3.2.2 气象条件允许情况下，开采作业期间洒水，使物料保持湿润。

7.3.2.3 矿区内物料存放的防尘抑尘措施包括封闭库房、防风围挡、防尘布或防尘网覆盖。

7.3.2.4 矿区道路和行车区域硬化或者采用粗砂石砾料铺设。

7.3.2.5 运送物料的车辆离开矿区前，对车体及轮胎进行清洗。

7.3.3 厂区

7.3.3.1 在确保安全的情况下，散装原燃料输送、装卸、倒运、配料、上料采用密闭作业。装

卸过程可根据实际情况采取喷淋喷雾等抑尘措施，转载、下料口应尽可能降低物料的落差，并安装集尘和除尘设施。

7.3.3.2 固定或连续作业的产尘点应设集尘罩和除尘设施，在不影响生产和安全的前提下，尽量提高收尘罩性能。

7.3.3.3 在满足安全生产的条件下，石灰石、泥质岩、煤矸石、原煤等原（燃）料应在全封闭式料棚内存放，料棚进出口应采用感应门，敞开作业期间，在气候条件允许情况下采用喷雾、洒水等抑尘措施。

7.3.3.4 粉磨后的生料、粉煤灰、矿渣粉、成品水泥等粉状物料采用密闭料仓、储罐等方式密闭储存。熟料采用密闭料库储存。粉料料库库顶泄压口配备袋式除尘器。

7.3.3.5 包装车间应全封闭。

7.3.3.6 料场出入口和易产尘点安装高清视频设施。

7.3.3.7 洗车台可自动或手动操作，运送物料的卡车进入厂区前和离开料场前进行底盘和车轮清洗。

8 污染防治可行技术路线

综合考虑污染物排放限值、原燃料条件生产工艺、场地条件、建设和运行成本等因素，因地制宜优选大气污染物深度减排污染防治可行技术。按照原、燃料条件、SO_2初始浓度等分类，窑头、窑尾、煤磨、水泥磨和其他排放口大气污染物深度减排污染防治可行技术路线见表 2。

表 2 水泥工业深度减排大气污染防治可行技术路线

可行技术	排放口	防治技术		排放水平（mg/m^3）	适用条件
		预防技术	治理技术		
可行技术 1	窑　头	—	袋式除尘（芳纶超细纤维梯度滤料或覆膜芳纶针刺毡或覆膜玻璃纤维机织布）	颗粒物≤10	新建或改造
可行技术 2	窑　尾	原料控硫技术+低氮燃烧器+脱硝炉	SNCR+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）	颗粒物≤10，SO_2≤35，NO_x≤100，氨逃逸≤8	SO_2 初始浓度≤35 mg/m^3
可行技术 3			SNCR+干反应剂喷注法干法脱硫+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）		SO_2 初始浓度≤800 mg/m^3
可行技术 4			SNCR+复合脱硫+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）		
可行技术 5			SNCR+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）+石灰石/石灰—石膏湿法脱硫		SO_2 初始浓度＞800 mg/m^3
可行技术 6		原料控硫技术+低氮燃烧器+热碳催化还原	SNCR+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）		SO_2 初始浓度≤35 mg/m^3
可行技术 7			SNCR+干反应剂喷注法干法脱硫+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）		SO_2 初始浓度≤800 mg/m^3
可行技术 8			SNCR+复合脱硫+袋式除尘		
可行技术 9			SNCR+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）+石灰石/石灰—石膏湿法脱硫		SO_2 初始浓度＞800 mg/m^3
可行技术 10		原料控硫技术+低氮燃烧器+分解炉分级燃烧	SNCR+SCR+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）		SO_2 初始浓度≤35 mg/m^3
可行技术 11			SNCR+SCR+干反应剂喷注法干法脱硫+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）		SO_2 初始浓度≤800 mg/m^3
可行技术 12			SNCR+SCR+复合脱硫+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）		
可行技术 13			SNCR+SCR+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）+石灰石/石灰—石膏湿法脱硫		SO_2 初始浓度＞800 mg/m^3
可行技术 14			精准 SNCR+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）		SO_2 初始浓度≤35 mg/m^3

续表 2 水泥工业深度减排大气污染防治可行技术路线

可行技术	排放口	防治技术		排放水平（mg/m^3）	适用条件
		预防技术	治理技术		
可行技术 15	排放口		精准 SNCR+干反应剂喷注法干法脱硫+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）		SO_2 初始浓度≤800 mg/m^3
可行技术 16			精准 SNCR+复合脱硫+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）		
可行技术 17			精准 SNCR+袋式除尘（覆膜玻璃纤维机织布或聚酰亚胺针刺毡）+石灰石/石灰—石膏湿法脱硫		SO_2 初始浓度＞800 mg/m^3
可行技术 18	煤　磨	—	三防（防油、防水、防静电）覆膜涤纶针刺毡	颗粒物≤10	新建或改造
可行技术 19	水泥磨	—	覆膜涤纶针刺毡或覆膜丙烯腈聚合体（亚克力）针刺毡	颗粒物≤10	新建或改造
可行技术 20	立　磨	清洁燃料	覆膜丙烯腈聚合体（亚克力）针刺毡	颗粒物≤10	有独立热源的矿渣粉磨
可行技术 21	其　他	—	覆膜涤纶针刺毡	颗粒物≤10	新建或改造

附录 A
（资料性）
典型新型干法水泥生产工艺流程及主要产污节点

新型干法水泥工艺通常包括矿山开采和原燃料处理、生料及燃料制备、烧成、水泥粉磨和水泥及熟料储运出厂等。典型新型干法水泥生产工艺流程及主要产排污节点见下图。

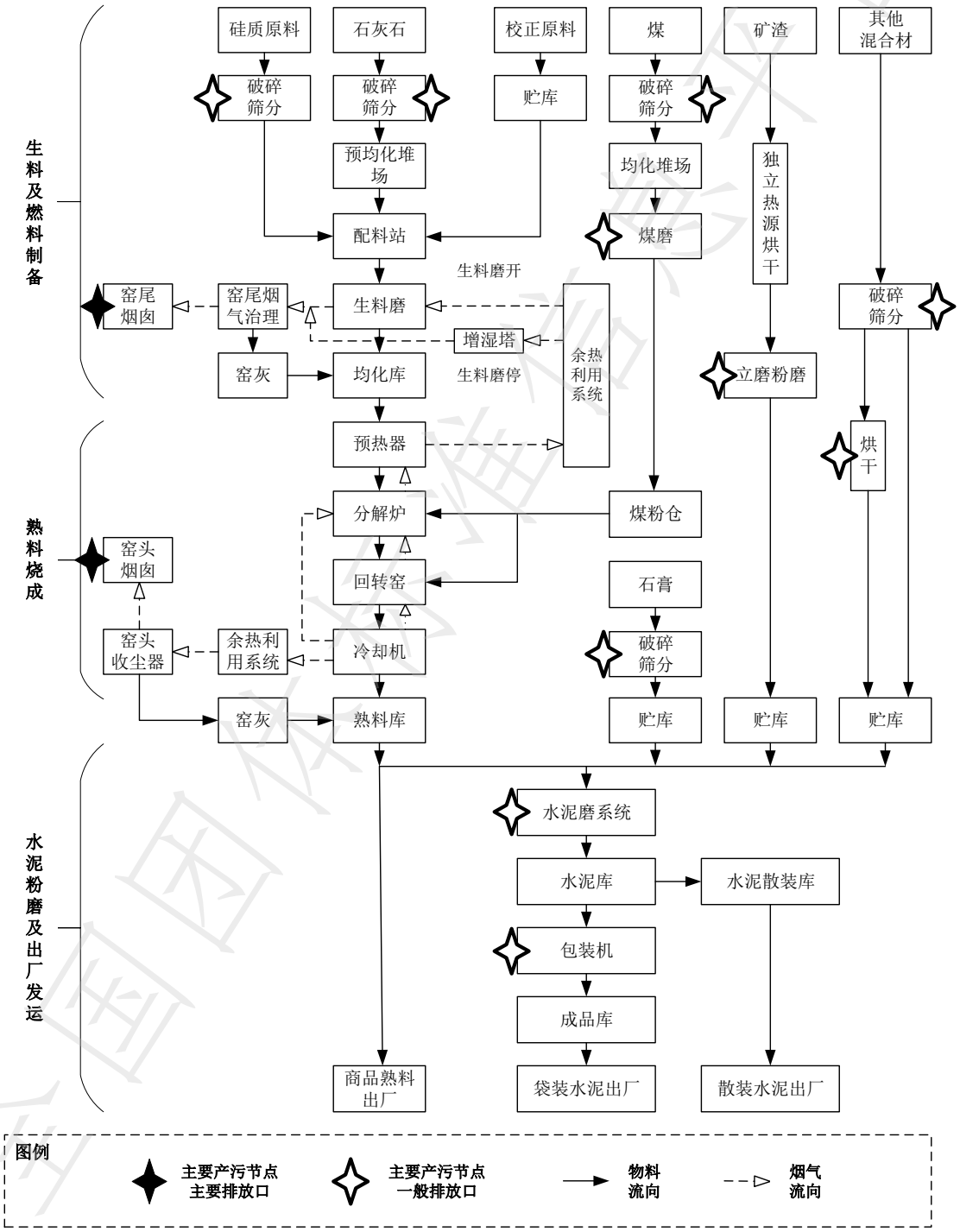

图 A 典型新型干法水泥生产工艺流程、主要产污节点及主要排放口