

《水泥工业大气污染物排放标准》（征求意见稿）

编制说明

《水泥工业大气污染物排放标准》编制组

二〇一二年十月

项目名称：水泥工业大气污染物排放标准（修订 GB4915-2004）

项目编号：2012-3

项目主管部门：环境保护部科技标准司

项目主管人员：裴晓菲、赵国华

编制单位及人员：环境保护部环境标准研究所

武雪芳 张国宁 江梅 李晓倩 魏玉霞等

合肥水泥研究设计院

陈章水 何宏涛 曹伟 袁文献等

中国环科院大气污染控制技术研究中心

张凡 王红梅等

目 录

1	项目背景	1
1.1	任务来源	1
1.2	工作过程	1
2	行业概况	2
2.1	我国水泥工业概况	2
2.2	水泥生产工艺	3
3	标准修订必要性分析	5
3.1	现行 GB 4915-2004 实施情况	5
3.2	环保形势变化要求对水泥行业严格排放控制	6
4	行业产排污情况及污染控制技术分析	6
4.1	水泥工业大气排放源	6
4.2	废气排放性质	8
4.3	污染控制技术分析	8
5	标准主要技术内容	11
5.1	修订原则	11
5.2	适用范围	11
5.3	标准内容框架	11
5.4	污染物项目与考核指标	11
5.5	标准修订的主要内容	12
6	标准限值与规定的制订依据	12
6.1	水泥窑大气污染物排放限值的确定	12
6.2	烘干机、烘干磨、煤磨、冷却机	18
6.3	其他通风生产设备	18
6.4	无组织排放限值	18
6.5	技术与管理规定	19
7	相关排放标准研究	20
7.1	国外标准	20
7.2	地方标准	24
8	实施本标准的经济成本与环境效益分析	24
8.1	实施本标准的经济成本	24
8.2	实施本标准的环境（减排）效益	25

《水泥工业大气污染物排放标准》编制说明

1 项目背景

1.1 任务来源

《水泥工业大气污染物排放标准》(GB4915-2004)是我国水泥工业环境管理的重要依据,在“十一五”污染减排工作中发挥了重要作用。为适应“十二五”环境管理需求,加强对颗粒物、SO₂、NO_x等的排放控制,亟需修订。为此环境保护部将其列为2012年标准制修订计划重点项目,由中国环境科学研究院牵头组织制订。

根据工作需要,中国环境科学研究院联合合肥水泥研究设计院等单位共同成立了标准编制组,拟定工作计划并开展相关标准编制工作。

1.2 工作过程

1.2.1 标准开题论证

2012年5月11日,环保部科技标准司在北京主持召开了标准开题论证会,标准编制组介绍了开题报告和标准草案的相关内容,经论证委员会各位专家及管理部门代表的讨论、质询,形成如下工作建议:

(1) 适用范围应考虑与固体废物共处置相关标准的衔接、协调;

(2) 编制组应在大量调查研究基础上,根据环境管理要求、控制技术支撑情况合理确定污染物项目及限值。

1.2.2 标准草案编制

根据开题论证会的指导意见,标准编制组明确了标准修订原则和框架构想,并按任务分工开展了相关工作。编制工作主要是通过重点污染源调查(资料研究、问卷调查、现场监测),对我国水泥工业的污染物排放和控制状况进行技术经济评估,同时考虑行业环境影响、参考国外相关法规标准和国家行业相关政策要求,最后确定排放标准限值和相关规定,并适当分析达标成本和环境效益。编制工作内容如图1-1所示:

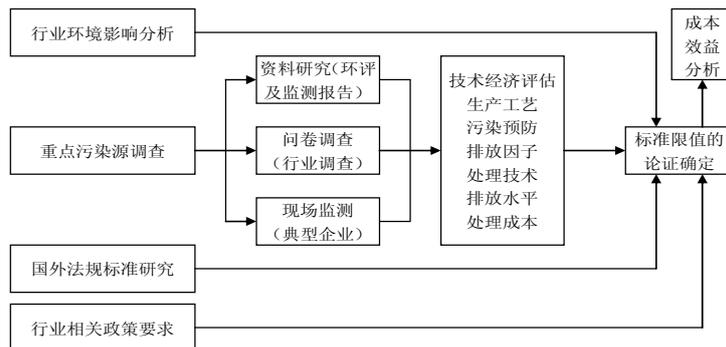


图 1-1 标准编制工作内容

2012年6月14日环保部科技司发函(环科便函〔2012〕27号)对我国水泥企业污染物排放与控制情况进行抽样调查,海螺、南方、华润、中材、拉法基、蒙西、塔牌、金圆等水泥企业(集团)积极响应,收到162条新型干法生产线数据,占全国新型干法生产线的10.7%,占熟料产能的12.5%,平均规模3500吨/天,为标准修订提供了客观、翔实的数据。

2012年6月-7月编制组成员陆续走访了都江堰拉法基、重庆拉法基、陕西声威、中材湘潭、铜陵海螺、武穴华新、福建龙麟等水泥生产企业,现场考察水泥脱硝设施、垃圾焚烧设施的运行情况,听取水泥企业对标准修订的意见和想法。

在前述工作基础上，标准编制组重点对水泥工业大气污染物排放设施、污染物控制项目及指标、排放限值水平、相关技术与管理规定、配套监测分析方法等标准主要技术内容进行了论证、确定，起草了《水泥工业大气污染物排放标准（征求意见稿）》和编制说明。

1.2.3 标准讨论会

2012年9月4日，环保部科技司在北京主持召开了标准（征求意见稿）讨论会，来自中国水泥协会、水泥企业、科研单位以及环境管理部门（环保部总量司、环评司、污防司、环监局）的专家、代表对标准进行了热烈讨论，认为适当修改适用范围的表述（水泥窑共处置固体废物应同时执行水泥工业污染排放标准和固废处置相关污染控制标准）、核实有关数据后可开展下一步征求意见工作。

1.2.4 标准征求意见

根据《国家环境保护标准制修订工作管理办法》（国家环境保护总局公告2006年第41号）规定，标准草案（征求意见稿）公开向全国征求意见。

2 行业概况

2.1 我国水泥工业概况

我国是水泥生产与消费大国，2011年我国水泥产量达到20.9亿吨，占世界水泥产量的一半以上，其中新型干法水泥比例接近90%，前10强企业（集团）水泥熟料产量占全国42%，结构调整取得突破性进展。现有规模以上水泥生产企业约4000家，新型干法水泥生产线1500多条。

表2-1是对我国水泥产量及新型干法水泥发展情况的统计。表2-2为截至2011年底的新型干法水泥生产线的规模分布情况。

表 2-1 我国新型干法水泥发展情况

年份	水泥产量（亿吨）	新型干法水泥产量（亿吨）	新型干法水泥比例（%）	新型干法生产线条数
2000	5.97	0.60	10.1	133
2001	6.64	0.94	14.2	170
2002	7.25	1.23	17.0	222
2003	8.62	1.90	22.0	320
2004	9.70	3.16	32.6	504
2005	10.6	4.73	44.6	624
2006	12.4	6.02	48.5	715
2007	13.6	7.15	52.6	802
2008	14.0	8.58	61.3	934
2009	16.5	12.7	77.0	1113
2010	18.8	14.9	79.3	1273
2011	20.9	18.6	89.0	1513

表 2-2 2011 年新型干法水泥生产线统计

规模，吨/	700	1000~1800	2000~2500	3000~3500	4000~4500	5000 及	合计

天						以上	
生产线数	30	309	568	81	66	459	1513
生产线比例	2%	20.4%	37.5%	5.4%	4.4%	30.3%	100%
熟料产能 万吨/年	674.25	11234.4	42333.6	7765.5	8246.0	73488.6	143742.35
产能比例	0.47%	7.82%	29.45%	5.4%	5.74%	51.12%	100%

另据环保部开展的水泥行业 NO_x 减排全口径统计，2011 年水泥熟料生产企业 2468 家（1203 企业有新型干法生产线），熟料产量 12.9 亿吨。其中新型干法生产线 1601 条，熟料产量 11.5 亿吨；立窑熟料产量 1.4 亿吨。

2.2 水泥生产工艺

如图 2-1 所示，水泥生产分为三个阶段：石灰质原料、粘土质原料与少量校正原料经破碎后，按一定比例配合、磨细并调配为成分合适、质量均匀的生料，这一过程称为生料制备；生料经预热器或预分解系统预热 / 分解后，在水泥窑内煅烧至部分熔融所得到的以硅酸钙为主要成分的水泥熟料，称为熟料煅烧；第三阶段为水泥粉磨，即熟料加入适量石膏，有时还有一些混合材料或外加剂共同磨细成为水泥成品。水泥在贮存时应进行检验，合格的水泥可以包装或散装出厂。

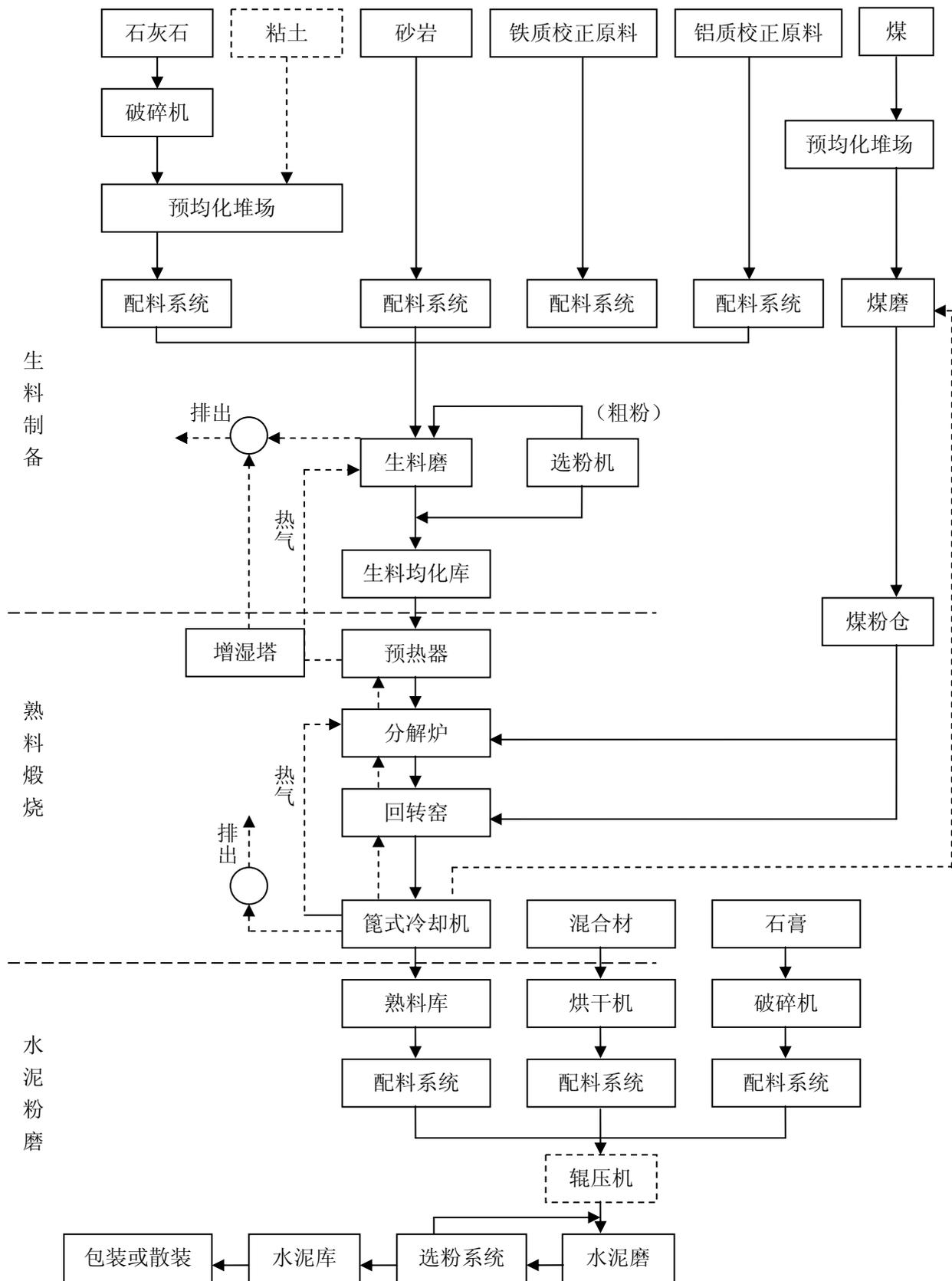


图 2-1 水泥生产工艺流程图

水泥熟料煅烧主要有两种方式（见图 2-2）：一种是以回转窑为主要生产设备，包括新

型干法窑、预热器窑、余热发电窑、干法中空窑、立波尔窑、湿法回转窑；另一种则是以立式窑为主要生产设备,包括普通立窑和机械化立窑。不同的水泥生产工艺与设备在规模效益、能源消耗、资源利用、污染排放等方面存在较大差别。根据国家产业政策要求,窑径 2.5m 以下干法中空窑(生产高铝水泥的除外)、立波尔窑、湿法回转窑(主要用于处理污泥、电石渣等的除外)、窑径 3.0m 以下机械化立窑、普通立窑等近年来已逐步淘汰,水泥生产格局发生了显著变化。新型干法窑外预分解技术已成为我国水泥生产的主导工艺,海螺等一大批企业集团迅速成长,带领中国水泥工业向着大型化、集约化方向迈进,我国最大规模的新型干法水泥生产线日产熟料 1.2 万吨,已达到国际领先水平。

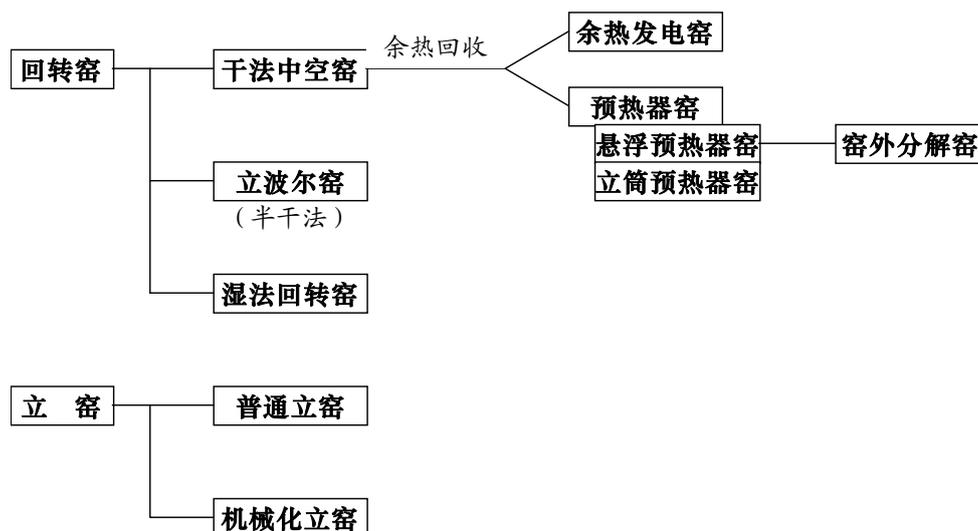


图 2-2 水泥窑类型

新型干法技术的核心是水泥熟料煅烧的窑外预分解技术,它是在悬浮预热技术的基础上发展起来的,不同型式的分解炉与各种预热器组成了不同类型的窑外分解系统。与在回转窑内完成预热、分解、烧成多个过程的传统工艺相比,它将熟料煅烧过程变成为在两套独立的设备内进行的两阶段操作:即在悬浮预热器和分解炉内完成生料预热和石灰石分解($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, 900°C);在回转窑内高温条件下($1400-1500^\circ\text{C}$)完成熟料烧成(形成硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙等)。由于在分解炉内引入第二热源(使用约 60%的燃料),降低了烧成带热负荷,提高了回转窑运转率和生产能力,同时也使能源消耗、污染物(特别是 NO_x 、 SO_2)排放大大降低。

现代化新型干法系统集成五级悬浮预热器、改进型分解炉和回转窑、多通道燃烧器、第四代篦冷机、窑头窑尾余热发电等多项技术于一体,再与新型节能粉磨系统、原燃料预均化系统、计量与自动化控制系统等组合在一起,代表着当代水泥生产的最高技术水平。

3 标准修订必要性分析

3.1 现行 GB 4915-2004 实施情况

“十一五”时期我国水泥工业迅猛发展,水泥产量由“十五”末的 10.6 亿吨增长到 2010 年的 18.8 亿吨,平均年增长率在 10%以上,带来了巨大的环境保护压力。据测算,水泥工业颗粒物排放占全国颗粒物排放量的 15—20%, SO_2 排放占全国 SO_2 排放量的 3—4%, NO_x 排放占全国 NO_x 排放量的 10—12%,是重点污染行业。

“十一五”期间我国全面加严了《水泥工业大气污染物排放标准》,要求颗粒物排放浓度控制在 50 mg/m^3 (热力过程)或 30 mg/m^3 (冷态操作)以下,达到了国际较先进的污染控制水平,可使吨水泥颗粒物排放控制在 1 kg/t 以下。为达到标准要求,水泥生产企业普遍

进行了环保设施提效改造，采用静电或布袋除尘技术实现达标排放。在水泥产量接近翻番的同时，年颗粒物排放可控制在 200—300 万吨（后者包含了非正常排放量），与“十五”末相比减少了 50%以上的颗粒物排放，环境效益十分突出。

新标准促进了水泥工业结构调整和产业优化升级，环保达标成为行业准入和核发生产许可证的前提条件。淘汰立窑、中空窑、湿法窑等落后产能，为新型干法水泥发展腾出了空间，水泥生产格局明显改观。目前新型干法水泥占到我国水泥总产量的 85%以上，在一些省市已完全取消了立窑水泥。以新型干法为代表的现代水泥企业生产效益好，控制污染的规模效益佳，其环保投资约占水泥生产线总投资的 8—10%，经济上可以承受。水泥工业成为我国走新型工业化道路的行业典范。

3.2 环保形势变化要求对水泥行业严格排放控制

《国务院关于印发“十二五”节能减排综合性工作方案的通知》（国发〔2011〕26 号）在“（十二）实施污染物减排重点工程”中要求：“推动燃煤电厂、水泥等行业脱硝，形成氮氧化物削减能力 358 万吨”。在“（十七）加强工业节能减排”中要求：“新型干法水泥窑实施低氮燃烧技术改造，配套建设脱硝设施”。

《国务院关于印发国家环境保护“十二五”规划的通知》（国发〔2011〕42 号）要求对水泥等行业 SO₂、NO_x 和 PM 进行控制，新型干法水泥窑要进行低氮燃烧技术改造，新建水泥生产线要安装效率不低于 60%的脱硝设施。在大气污染联防联控重点区域，实施区域大气污染物特别排放限值。

《国务院关于印发节能减排“十二五”规划的通知》（国发〔2012〕40 号）要求 2015 年水泥行业 NO_x 排放量控制在 150 万吨，淘汰水泥落后产能 3.7 亿吨。推广大型新型干法水泥生产线，普及纯低温余热发电技术。水泥行业实施新型干法窑降氮脱硝，新建、改扩建水泥生产线综合脱硝效率不低于 60%。

上述要求是明确的，需要通过修订《水泥工业大气污染物排放标准》（GB 4915-2004）予以落实。水泥工业的颗粒物控制一向严格，通过采用高效静电或布袋除尘器，颗粒物排放可限制在 20—30 mg/m³ 以下，一些采用新型覆膜滤料的除尘器，可控制颗粒物在 10 mg/m³ 以下。

NO_x 是水泥工业需要重点控制的污染物，“十二五”期间，NO_x 纳入总量控制指标，这对水泥工业污染治理提出了更高要求，要求采用低 NO_x 燃烧技术、烟气脱硝技术大幅降低水泥窑 NO_x 排放水平。水泥企业积极响应，各地纷纷筹划建设了一大批水泥脱硝示范项目，十几条线已建成运行，为本次标准修订提供了良好技术基础和参考实例。但也应承认，由于我国水泥工业在这方面工作刚刚起步，分级燃烧、SNCR 等技术应用还缺乏长期稳定运行经验，SCR 技术尚不成熟，面临的环保挑战是巨大的。

4 行业产排污情况及污染控制技术分析

4.1 水泥工业大气排放源

4.1.1 矿山开采

矿山开采是原料的获得过程。熟料煅烧所需要的石灰石/泥灰岩/白垩（提供了 CaCO₃ 的来源）和粘土/页岩等，通常由露天采石场、取土场获得。需要的作业包括钻孔、爆破、挖掘、运输和破碎。一般采矿场紧邻工厂，初次破碎后的原料输送至水泥厂贮存、备料。

粉尘无组织排放源在矿山开采过程中普遍存在。破碎机则是主要的有组织排放源，还有其它一些设备，如装卸、输送设备等，需要通风除尘。

4.1.2 水泥制造（含粉磨站）

在水泥制造过程中，原料进厂后需要经过原料破碎、原料烘干、生料粉磨、煤粉制备、

生料预热/分解/烧结、熟料冷却、水泥粉磨及成品包装等多道工序，每道工序都存在着不同程度的颗粒物排放（有组织或无组织），而水泥窑系统则集中了 70%的颗粒物有组织排放和几乎全部气态污染物（SO₂、NO_x、氟化物等）排放。

按生产流程，水泥厂的主要大气排放源有：

（1）原料贮存与准备：破碎机、烘干机、烘干磨、生料磨、储料场或原料库、喂料仓、生料均化库。

（2）燃料贮存与准备：破碎机、煤磨（烘干+粉磨）、煤堆场、煤粉仓。

（3）熟料煅烧系统：窑尾废气、冷却机废气（窑头）、旁路气体（预热器旁路，控制挥发性元素 S、Cl、碱金属的含量）

（4）水泥粉磨和贮存：熟料库、混合材库、水泥磨、水泥库。

（5）包装和配送：包装机、散装机。

表 4-1 按污染源性质（热力过程和冷态操作两类）对水泥企业大气排放源进行归类。水泥厂露天堆场、道路的扬尘，以及管道、设备的含尘气体溢出或泄漏，造成较多的无组织排放，影响局部环境。但对更大范围的环境空气质量而言，工艺尾气（通过高烟囱排放）的影响则要广泛得多。因此，对水泥企业的有组织排放控制（排气筒）和无组织排放控制同等重要。

表 4-1 水泥厂大气排放源归类

排放源性质		生产设备（设施）	排放形式	污染物	GB4915 的划分
热力过程	燃烧	水泥窑	排气筒	粉尘; 气态污染物	水泥窑及窑磨一体机
	干燥	烘干机、烘干磨、煤磨	排气筒	粉尘	烘干机、烘干磨、煤磨及冷却机
	冷却	冷却机	排气筒	粉尘	
冷态操作	加工	破碎机、生料磨、水泥磨	排气筒	粉尘	破碎机、磨机、包装机及其它通风生产设备
	贮存	储料场、煤堆场	无组织	粉尘	
		原料库、喂料仓、生料均化库、煤粉仓、熟料库、混合材库、水泥库	排气筒	粉尘	
	其它	包装机、散装机、输送设备、装卸设备、运输设备等	有些有排气筒，但无组织逸散较多	粉尘	

一些大型水泥集团在区域布局上采取了“大型熟料生产基地+销售地粉磨站”形式，独立粉磨站的生产包括：水泥熟料、混合材、石膏等原料运输进厂，水泥配料/粉磨，水泥库贮存，水泥包装或散装出厂。污染排放与水泥制造的后续过程（水泥粉磨）相同。

4.1.3 散装水泥中转站

在沿海、沿江一些地区存在着散装水泥中转站，其工艺流程与水泥企业散装水泥相似，均是对水泥成品的进出库操作。主要设备是卸船机、空气输送斜槽、提升机、水泥仓、散装机等。水泥仓的顶（底）安装除尘器，一般为单机袋除尘；卸料口、转运点等分散扬尘点处设置集尘罩，抽吸含尘气体进行单独或集中处理（袋除尘）。

4.1.4 水泥制品生产

水泥制品生产包括：（1）预拌混凝土、预拌砂浆；（2）混凝土预制件。不包括水泥的施工现场搅拌。

主要污染排放产生在水泥仓进出料过程，需要过滤除尘（布袋等）。其它排尘点还包括称料斗、搅拌机、传送带等。预拌混凝土、砂浆的生产以及预制件的制作过程需要加入水，起到了抑尘作用。

4.2 废气排放性质

水泥生产是通过生产线各设施（设备）的运行，把原料加工成水泥，不仅有对物料破碎和粉磨的物理过程，还有燃料燃烧和物料分解、相互反应生成水泥熟料的化学过程。在这个过程中排放的大气污染物主要有烟（粉）尘、SO₂、NO_x、CO₂、CO、氟化物等。由于各设备处理物料不同、工作原理和工作过程不同，排出废气的性质也各不相同，如污染物种类、浓度、烟气温度、含湿量、比电阻等。表 4-2 列出了一些主要生产设备的废气排放性质。

表 4-2 主要生产设备的废气排放性质

设备	新型干法窑			篦冷机	生料立磨	水泥管磨	煤磨
污染物	PM	SO ₂	NO _x	PM	PM	PM	PM
原始浓度, g/m ³	30—80	0.05—0.2	0.8—1.2	2—20	400—800	20—120	250—500
气体温度, °C	300—350			150—300	70—110	90—120	60—90
含湿量, 体积%	6—8			—	10	—	8—15
露点, °C	35—40			—	45	—	40—50
比电阻, Ω·cm	≥10 ¹²			10 ¹¹ —10 ¹³	—	—	—

4.3 污染控制技术分析

根据不同设备的废气排放性质，选择技术可行、经济合理的污染控制技术。水泥工业过去主要控制颗粒物的排放，根据环保形势的发展，需要开展水泥窑烟气脱硝。

4.3.1 颗粒物控制

水泥工业目前使用的除尘技术主要是布袋除尘、静电除尘以及电袋复合。水泥窑的窑头、窑尾，采用布袋除尘器或静电除尘器均可，根据烟气性质，一般需要对烟气降温调质，采用增湿等措施将高温气体降到 150°C 以下和适宜的比电阻 (<10¹¹Ω·cm)。其他通风生产设备、扬尘点大多采用布袋除尘器。

(1) 布袋除尘

布袋除尘技术是利用纤维织物的过滤作用（纤维过滤、膜过滤和颗粒过滤）对含尘气体进行净化。它处理风量范围大、使用灵活，适用于水泥工业各工序废气的除尘治理。

选择适当的过滤材料是布袋除尘器的关键，目前可供选择的滤料材质主要有涤纶（聚酯）、丙纶（聚丙烯）、亚克力（聚丙烯腈）、PPS（聚苯硫醚）、诺梅克斯（芳香族聚酰胺）、玻璃纤维、P84（聚亚酰胺）和 PTFE（聚四氟乙烯）等。

在国内水泥工业生产中，破碎、粉磨、包装、均化和输送系统以及其他扬尘点用布袋除尘器主要选用涤纶滤料。煤粉制备系统用布袋除尘器主要选用抗静电涤纶滤料。水泥窑尾布袋除尘器主要用玻纤滤料和 P84 滤料。由于诺梅克斯（Nomex）综合性能好，用途较为广泛，典型用途是水泥窑头篦冷机余风的除尘，其过滤风速比用玻纤滤料高，可减小除尘器体积。PTFE 性能好，摩擦系数小、耐高温，制成薄膜的微孔多而小，形成表面过滤，目前利用它的优越性，制成表面覆膜，大大改善了普通滤料的过滤性能。

过滤风速、清灰方式对除尘效率有重大影响，如排放浓度限值低，应相应降低过滤风速。最早的布袋除尘器是人工振打清灰，以后采用机械振打，目前已被淘汰，现在主要使用反吹

风清灰和压缩空气清灰（气箱式、脉喷式），后者是目前的主流，可实现在线清灰。

布袋除尘器的箱体大多按模块结构设计，即按一定的布袋数构成一个单元滤室，若干个滤室组成一个除尘器，例如气箱脉冲布袋除尘器可分别以 32、64、96、128 条袋为一个滤室。这有利于系统维护和环境保护，发现故障、破损及时对有问题的单元滤室进行在线检修，不影响布袋除尘器的总体性能。

布袋除尘技术的除尘效率可达 99.80—99.99%，颗粒物排放浓度可控制在 30 mg/m^3 以下，运行费用主要来自于更换滤袋和引风机电耗。

（2）静电除尘

静电除尘技术是通过电晕放电使粉尘荷电，然后在电场力作用下，向集尘极移动并沉积在表面上，通过振打将沉积的粉尘去除，烟气得以净化。它适合大风量、高温烟气的处理，主要用于水泥窑头、窑尾烟气除尘。

静电除尘器由供电装置和除尘器本体两部分构成。除尘器本体包括放电电极、集尘电极、振打清灰装置、气流分布装置、高压绝缘装置、壳体等。

供电装置为粉尘荷电和收尘提供所需的电场强度和电晕电流，要求能与不同工况使用的静电除尘器有良好的匹配，从而提高除尘效率和工作稳定性。提高高压电源性能一直是静电除尘技术发展的一个方向，如开发专家控制系统减少人工干预，根据烟气条件变化及时调整控制参数和控制方式；使用高频电源、脉冲电源、三相电源等。

静电除尘器的除尘效率既与粉尘比电阻等废气性质有关，也取决于集尘板面积、气流速度等结构设计参数。可以通过增加集尘板面积、增加通道数、增加电场级数等方法提高静电除尘器性能。通常，一台三电场的静电除尘器，其第一电场通常有 80—90% 的除尘效率，而第二、三级电场仅收集含尘量小于 10 g/m^3 （对回转窑而言）的烟粉尘。有时为了达到 50 mg/m^3 以下的低排放浓度，收集很少的粉尘，需要增设第四、五级电场。可见为了提高除尘效率满足严格的排放标准要求，增加电场级数逐渐趋向经济不合理。

由于第一电场捕集粒径比较粗的颗粒，后续电场捕集的粉尘愈来愈细，最后一个电场捕集的都是微细粉尘，当振打清灰时产生二次扬尘，使部分微细粉尘直接排入大气。因此减少二次扬尘是控制颗粒物排放非常关键的环节，可采用移动电极技术。移动电极的工作原理是将常规卧式静电除尘器最后一个电场的固定电极设计为旋转电极，变阳极机械振打清灰为下部毛刷扫灰，从而改变常规电除尘最后一个电场的捕集和清灰方式，以适应超细颗粒和高比电阻颗粒的收集，提高除尘效率。移动电极技术是静电除尘器未来的发展方向。

此外，振打清灰装置的振打方式、振打频率和强度，气流分布装置的气流分布均匀性也都对除尘效率有影响。

静电除尘技术的除尘效率为 99.50—99.97%，颗粒物排放浓度可控制在 50 mg/m^3 以下，消耗主要为电能。

（3）电袋复合

电袋复合除尘器，就是在除尘器的前部设置一个除尘电场，发挥电除尘器在第一电场能收集 80—90% 粉尘的优点，收集烟气中的大部分粉尘，而在除尘器的后部装设滤袋，使含尘浓度低的烟气通过滤袋，这样可显著降低滤袋的运行阻力，延长清灰周期，缩短脉冲宽度，降低喷吹压力，延长滤袋的使用寿命，相应减少了运行维护成本。

电袋复合除尘技术特别适合于原有静电除尘器的改造，它充分结合了电、袋除尘的优点，除尘效率可达 99.80—99.99%，颗粒物排放浓度小于 30 mg/m^3 。

4.3.2 NO_x 控制

水泥窑型对 NO_x 排放有重大影响，新型干法工艺能显著降低 NO_x 排放。NO_x 的产生与燃烧状况密切相关，因此可采取工艺控制措施，如低 NO_x 燃烧器、分解炉分级燃烧。采用末端治理的方法，如 SNCR、SCR，是有效去除 NO_x 的环保措施。

(1) 清洁生产工艺

新型干法水泥生产用燃料分别从窑头和分解炉喷入，窑头煤粉燃烧最高温度可达1600℃以上，且烧成废气在高温区停留时间较长；煤粉在分解炉处于无焰燃烧状态，燃烧温度为900℃左右。由于60%的燃料在分解炉内燃烧，燃烧温度低，在此几乎没有热力型NO_x生成，只产生燃料型NO_x，因此与普通回转窑（2.4 kgNO_x/t 熟料）相比，削减了约1/3的NO_x排放，可使新型干法工艺NO_x排放量控制在1.6 kgNO_x/t 熟料。

(2) 工艺控制措施

工艺控制措施主要是应用低NO_x燃烧器、分解炉分级燃烧，以及保证水泥窑的均衡稳定运行。

低NO_x燃烧器具有多通道设计，一般为三、四通道，分为内风、煤风、外风，各有不同的风速和方向（轴向、径向），在出口处汇合形成同轴旋转的复杂射流。操作时通过调整内、外风速和风量比例，可以灵活调节火焰形状和燃烧强度，使煤粉分级燃烧，减少在高温区的停留时间，相应减少了NO_x产生量。

分解炉分级燃烧包括空气分级和燃料分级两种，都是通过对燃烧过程的控制，在分解炉内产生局部还原性气氛，使生成的NO_x被部分还原，从而实现水泥窑系统NO_x减排。

工艺波动会造成水泥窑NO_x浓度的剧烈变化（NO_x浓度可作为水泥窑工艺控制参数），需要保持水泥窑系统的均衡稳定运行。通过保持适宜的火焰形状和温度，减少过剩空气量，确保喂料量和喂煤量准确均匀稳定，可有效降低NO_x排放。

上述工艺控制措施综合使用，大约可降低30%的NO_x排放量，相应NO_x排放浓度可控制在500—800 mg/m³。

(3) 末端治理措施

目前应用较多、相对成熟的末端治理措施是选择性非催化还原技术（SNCR），选择性催化还原技术（SCR）还在进一步示范完善中。

SNCR是以分解炉膛为反应器，通过向高温烟气（850—1100℃）中喷入还原剂（常用液氨、氨水和尿素），将烟气中的NO_x还原成氮气和水。该技术系统简单，NO_x去除效率约40—60%，排放浓度可控制在400—500 mg/m³。

SCR是在水泥窑预热器出口处安装催化反应器，在反应器前喷入还原剂（如氨水或尿素），在适当的温度（300—400℃）和催化剂作用下，将烟气中的NO_x还原成氮气和水。该技术NO_x去除效率可达70—90%，排放浓度可控制在100—200 mg/m³。SCR技术一次投资较大，运行成本主要取决于催化剂的寿命。由于水泥窑尾废气粉尘浓度高，且含有碱金属，易使催化剂磨损、堵塞和中毒，需要采用可靠的清灰技术和合适的催化剂。

4.3.3 其他大气污染物控制

水泥窑的高温、长停留时间、氧化气氛、碱性条件，有利于酸性气体（HCl、SO₂等）、有机物的去除，重金属（Hg除外）固结在水泥熟料中，因此其他大气污染物排放量很少。

通过选择和控制进入水泥窑的物料品质，如合理的硫碱比、较低的N、Cl、F、金属、挥发性有机物含量等，可减少SO₂、卤化物、重金属、二噁英等大气污染物的产生和排放。如污染物排放浓度较高，则应进一步采取干、湿法洗涤、活性炭吸附等强化处理措施。

4.3.4 无组织排放控制

水泥工业的粉尘无组织排放是一个突出的环境问题，采取密闭作业可有效予以解决。例如有些先进水泥企业采用全封闭物料输送、帐篷式预均化库，有效控制了扬尘。当然也可根据实际情况采取其他措施，如覆盖（结壳剂）、洒水、设置防风墙等。其他措施还包括合理的工艺布置、适当维护、加强清扫管理等。通过对这些措施的综合使用，可有效降低粉尘无组织排放。

5 标准主要技术内容

5.1 修订原则

(1) 根据水泥工业先进生产工艺(新型干法)和可行污染控制技术,制订排放限值。不区分工艺(窑型)差异,鼓励采用先进工艺。

(2) 大气污染物排放控制采用浓度指标,以反映污染防治技术水平,方便环境管理,同时为防止稀释排放规定了水泥窑烟气中 O₂ 含量。

(3) 取消单位产品排放量指标(kg/t)。该指标用于评估企业环境绩效,如清洁生产标准,一般不用于执法目的。根据排放浓度及单位产品(物料)废气量(如新型干法窑尾废气量 2000—3000 m³/t 熟料)可以很容易核算出单位产品排放量。

(4) 区分新老污染源,分别制订现有企业、新建企业排放限值,新源限值适度从严。

(5) 现有企业经一段时间的过渡期后,达到新源标准,以促进生产工艺和污染治理技术进步、产业优化升级。

(6) 在重点区域坚持环境优先,通过环境保护优化经济发展,制订大气污染物特别排放限值。

5.2 适用范围

本标准适用于水泥工业的大气污染物排放控制与管理。在 GB4915-2004 适用范围:水泥矿山开采、水泥制造、水泥制品生产的基础上,增加散装水泥中转站。

5.3 标准内容框架

本标准内容包括:适用范围、规范性引用文件、术语和定义、大气污染物排放控制要求、监测、实施与监督共 6 章。

大气污染物排放控制要求是本标准的重点,主要技术内容包括三部分:

(1) 大气污染物排放限值

根据前述生产工艺与污染物排放分析,区分“矿山开采”、“水泥制造”、“散装水泥中转站及水泥制品生产”三个生产过程,矿山开采的受控设施为“破碎机及其他通风生产设备”;水泥制造的受控设施包括“水泥窑及窑磨一体机”、“烘干机、烘干磨、煤磨及冷却机”、“破碎机、磨机、包装机及其他通风生产设备”三类不同性质的生产设备;散装水泥中转站及水泥制品生产的受控设施为“水泥仓及其他通风生产设备”。它们执行不同的污染物控制项目与考核指标。

(2) 无组织排放限值

规定厂界无组织排放监控要求,因无组织排放造成的厂界处污染物浓度应达到或接近环境质量标准的要求。

(3) 技术与管理规定

包括无组织排放控制措施、废气收集处理要求、净化处理装置与生产工艺设备同步运转的要求,以及排气筒高度要求等。

5.4 污染物项目与考核指标

5.4.1 污染物项目

水泥窑及窑磨一体机的污染物控制项目包括:颗粒物、SO₂、NO_x、氟化物,如采用 SNCR、SCR 等喷氨控制 NO_x 措施,还包括 NH₃ 项目。

其他通风生产设备执行颗粒物控制项目。

5.4.2 考核指标

考虑到生产工艺情况、防止稀释排放的环境管理要求,以及标准的前后衔接等,本标准对受控设施的大气污染物排放,规定了最高允许排放浓度指标。

对于水泥窑及窑磨一体机，实测烟气中大气污染物排放浓度应换算到基准氧含量 10%（过剩空气系数约 1.9）状态下的数值。换算公式为：

$$C_{\text{基}} = \frac{21-10}{21-O_{\text{实}}} \cdot C_{\text{实}}$$

式中：C 基——大气污染物基准排放浓度， mg/m^3 ；

C 实——实测排气筒中大气污染物排放浓度， mg/m^3 ；

O 实——干烟气中含氧量百分率实测值。

其他车间或生产设施排气按实测浓度计算，但不得人为稀释排放。

5.5 标准修订的主要内容

（1）进一步降低颗粒物排放水平

现行标准颗粒物排放控制要求为：回转窑等热力设备 $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，水泥磨等冷态操作 $30 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，达到了国际较先进的控制水平。但也应看到，目前除尘技术发展很快，采用高效静电或布袋除尘技术可进一步降低颗粒物排放至 $20-30 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，甚至 $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以下，且技术已相当成熟，为标准提高颗粒物排放控制要求创造了条件。

（2）严格水泥工业 NO_x 控制

目前我国水泥工业的 NO_x 排放约占全国总排放量的 10—12%，按全国抽样调查的统计平均结果以及污染源普查的排污系数计算，每吨熟料排放约 1.6 kgNO_x ，按 2011 年 14 亿吨新型干法熟料产能计算，满负荷生产可排放 NO_x 224 万吨（2011 年实际排放 NO_x 约 190 万吨），是继火电厂、机动车之后的第三大排放源。随着“十二五”期间我国对 NO_x 实施总量控制，水泥行业的脱硝要求成为大势所趋。为此，有必要在现行标准基础上提高 NO_x 排放控制要求，促进水泥行业采取有效的 NO_x 控制措施。

现行标准 NO_x 排放浓度为 $800 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，这是基于低 NO_x 燃烧器的基本控制水平。按照规划要求，新建生产线要求脱硝 60% 以上，排放浓度应限制在 $300-400 \text{ mg}/\text{m}^3$ ，达到美国、欧洲的先进控制水平。

（3）水泥窑共处置固体废物执行统一的标准

现行标准对水泥窑焚烧处置危险废物有明确排放限制要求，但不完整，也不包括利用水泥生产设施（水泥窑、水泥磨等）协同处置一般工业固体废物、城市垃圾、污泥、受污染土壤等内容，而后者日益受到重视，相关污染控制标准、规范正在制订完善中。

利用水泥生产设施协同处置危险废物、生活垃圾等固体废物时，其常规污染物（PM、 SO_2 、 NO_x 、F）排放应执行本标准的规定，它们与水泥生产工艺更相关。而重金属、二噁英等有毒污染物的排放限值，以及选址条件、固体废物入场要求、处置设施性能要求与运行控制等内容则应执行固体废物共处置相关标准、规范的要求。这样保证了标准限值的科学性、体系的严密性，便于固废管理和处置利用。为此，本标准规定：

“利用水泥生产设施协同处置危险废物、生活垃圾等，除执行本标准外，还应同时执行国家关于固体废物共处置相关污染控制标准、规范的规定”。

6 标准限值与规定的制订依据

6.1 水泥窑大气污染物排放限值的确定

水泥窑是水泥制造企业的核心设备，也是最重要的大气排放源。其排放的污染物不仅有颗粒物，还有 NO_x 、 SO_2 、 CO_2 、CO 等气态污染物；如水泥窑用于焚烧处置固体废物，还可能有重金属、二噁英等排放。

6.1.1 颗粒物

新型干法窑的颗粒物初始浓度约 30—80 g/m³，经烟气调质 / 余热利用 + 布袋或静电除尘，排放浓度可低于 30 mg/m³，除尘效率大于 99.9%。布袋除尘器一般采用涤纶、玻璃纤维、P84（聚亚酰胺）滤料，有些还使用了 PTFE（聚四氟乙烯）覆膜；静电除尘器通常为四、五级电场。

为配合本次标准修订，标准编制组对全国水泥生产企业的污染排放与控制情况进行了抽样调查。调查共获得 160 个有效样本（水泥窑数量），水泥窑颗粒物排放现状见表 6-1，同时还列出了相关研究数据。与 2003 年编制组的抽样调查对比，窑尾颗粒物浓度显著降低，从平均 100.9 mg/m³ 下降到目前的平均 27.4 mg/m³，接近了欧洲的排放水平。从布袋与静电除尘器的使用情况看，窑尾采用布袋除尘器略多一些，较上次调查（90%使用静电）有了明显变化。布袋除尘器的总体去除效果要优于静电除尘器，平均低 5 mg/m³ 左右（布袋：25.2 mg/m³，静电：30.0 mg/m³），但都能满足现行标准要求。

表 6-1 水泥窑颗粒物排放统计表

数据来源 统计项目	本次标准修订抽样调查			与 2003 年 抽样调查 对比	中国建材 院 2009 年 数据 ^①	欧洲 2004 年监测数 据 ^②
	布袋	静电	合计			
水泥窑数量	85	75	160	90	31	253
平均排放浓度 mg/m ³	25.2	30.0	27.4	100.9	42.39	20.3
最大值, mg/m ³	49.3	78.9	78.9	371.5	221.5	227.0
最小值, mg/m ³	0.23	4.12	0.23	12.6	7.8	0.27

下表 6-2 是窑尾颗粒物排放浓度的累积分布，其中绝大多数水泥窑（约 95%）符合现行标准 50 mg/m³ 要求，可见随着除尘技术的进步，排放标准具备了加严条件。有 60% 的水泥窑颗粒物排放控制在 30 mg/m³ 以下，甚至有 32% 的水泥窑达到了 20 mg/m³ 以下。据此本次标准修订将水泥窑颗粒物排放浓度从 50 mg/m³ 加严到 30 mg/m³，达到欧洲国家平均的标准或许可证限值水平；而对重点地区水泥企业则要求进一步控制到 20 mg/m³ 以下（德国环保标准非常严格，目前限值要求为 20 mg/m³）。

表 6-2 水泥窑颗粒物排放浓度累积分布

比例	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
浓度 mg/m ³	10.8	15.7	19.6	23.0	25.6	30.0	33.6	39.7	45.0	78.9

标准提高后，需要对现有窑尾除尘设备进行技术改造，如布袋除尘器更换为玻纤覆膜或 P84 覆膜滤料；静电除尘器提效改造（如增加电场级数、提高高压电源性能、采用移动电极技术）或“电改袋”、“电改为电袋复合”。

6.1.2 SO₂

SO₂ 排放主要取决于原、燃料中挥发性 S 含量。如硫碱比合适，水泥窑排放的 SO₂ 很少，有些水泥窑在不采取任何净化措施的情况下，SO₂ 排放浓度可以低于 10 mg/m³。随着原燃料

^① 中国建材院，我国水泥工业大气污染物排放与治理研究，2011 中国水泥环资论坛

^② 欧盟委员会，水泥、石灰和氧化镁制造业 BAT 参考文件，2010

挥发性 S 含量（硫铁矿 FeS_2 、有机硫等）的增加， SO_2 排放浓度也会增加。

本次标准修订开展的抽样调查，共获得 153 个有效的水泥窑 SO_2 排放样本，平均排放浓度 59.6 mg/m^3 ，较 2003 年调查的 159.2 mg/m^3 有显著降低，其根本原因是水泥窑型发生了显著变化，以往 SO_2 排放较多的湿法窑、机立窑已被新型干法窑替代。与欧洲监测数据比，我国的水泥窑 SO_2 排放浓度更低，见表 6-3。

表 6-3 水泥窑 SO_2 排放统计表

统计项目 \ 数据来源	本次标准修订 抽样调查	与 2003 年抽样 调查对比	中国建材院 2009 年数据	欧洲 2004 年监 测数据
水泥窑数量	153	40	31	253
平均排放浓度, mg/m^3	59.6	159.2	35.52	218.9
最大值, mg/m^3	310	520	391	4837
最小值, mg/m^3	0.25	10	0	0

从水泥窑 SO_2 排放浓度的累计分布看，几乎所有水泥窑（约 98%）都能符合现行标准（ 200 mg/m^3 ）的要求，78% 的水泥窑可控制在 100 mg/m^3 以下，65% 的水泥窑可控制在 50 mg/m^3 以下，见表 6-4。这是因为水泥窑本身就是性能优良的固硫装置，水泥窑中大部分的 S 都以硫酸盐的形式保留在水泥熟料中， SO_2 排放不多，特别是预分解窑，因分解炉内有高活性 CaO 存在，它们与 SO_2 气固接触好，可大量吸收 SO_2 ，排放浓度相应可控制在 $50\text{--}200 \text{ mg/m}^3$ 以下。

表 6-4 水泥窑 SO_2 排放浓度累积分布

比例	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
浓度 mg/m^3	4.6	10.5	15.0	18.8	30.3	43	65	119	178	310

另外，如果将窑尾废气送入正在运行中的生料磨（窑磨一体机），会获得额外的 SO_2 吸收能力（可能高达 80%），因此可作为 SO_2 的污染削减装置。表 6-5 为生料磨开启、停运时的 SO_2 排放浓度对比。

表 6-5 生料磨的 SO_2 控制效果

	生料磨未运行	生料磨同步运行	SO_2 去除效果
水泥窑 1	247.5 mg/m^3	47.9 mg/m^3	80%
水泥窑 2	181.9 mg/m^3	96.4 mg/m^3	47%

根据以上分析，本次标准修订将水泥窑 SO_2 排放浓度从 200 mg/m^3 加严到 100 mg/m^3 ，对重点地区要求进一步控制到 50 mg/m^3 以下。只要硫碱比控制合适（这是工艺控制指标，防止预热器结皮堵塞或窑内结圈）、原料中挥发性 S（如有机 S、 FeS_2 ）含量不特别高，一般不需要采取附加措施，或通过窑磨一体化运行即可解决。

如原料中挥发性 S 含量很高，它们在预热阶段会逃逸出悬浮预热器，此时没有活性 CaO 与之反应，或生料磨不足以将之完全去除，可能有较高的 SO_2 排放，这时需要采取干、湿法洗涤、活性炭吸附等附加措施。

6.1.3 NO_x

NO 和 NO_2 是水泥窑 NO_x 排放的主要成分（NO 约占 95%），主要有两种形成机理：（1）

热力型 NO_x；(2) 燃料型 NO_x。水泥生产中，热力型 NO_x 的排放是主要的。

因水泥窑内的烧结温度高、过剩空气量大，NO_x 排放会很多。调查统计的初始浓度范围大多在 800—1200 mg/m³（80%都在 1000mg/m³ 以下）。一些新型干法窑采取了低 NO_x 燃烧器，控制分解炉燃烧产生还原性气氛，使 NO_x 部分被还原，排放浓度可降低到 500—800 mg/m³。

目前开发的 NO_x 控制技术有低 NO_x 燃烧器、分级燃烧、添加矿化剂、工艺优化控制（系统均衡稳定运行）等一次措施，以及选择性非催化还原技术（SNCR）、选择性催化还原技术（SCR）等二次措施。欧洲认为综合使用这些技术措施后（SCR 除外），排放控制水平应达到 200—500 mg/m³，若使用 SCR 技术，则可进一步控制在 100—200 mg/m³。

表 6-6 为水泥窑 NO_x 控制措施的效果及大致的排放浓度范围。

表 6-6 水泥窑 NO_x 控制措施效果

措施分类		削减效率 (%)	排放浓度 (mg/m ³)
一次措施	低 NO _x 燃烧器	5-30	500-800
	分级燃烧	10-30	
	添加矿化剂	10-15	
	工艺优化控制	10-20	
二次措施	SNCR	40-60	400-500
	SCR	70-90	100-200

本次标准修订开展的抽样调查，共获得 148 个有效的水泥窑 NO_x 排放样本，平均排放浓度 621.5 mg/m³，最低值 234 mg/m³（采取了分级燃烧+SNCR），最高值 1233 mg/m³，见表 6-7。这些数据源自竣工验收、环保监督检查以及在线监测，反映了企业在较佳工艺条件下能够达到的 NO_x 控制水平。水泥窑的 NO_x 浓度是动态变化的，这与窑和分解炉的运行控制密切相关，平均会有 20%左右的变化（对同一水泥窑不同时期监测统计平均的结果），企业会根据在线反馈的数据及时调整，保证窑况的均衡稳定。

表 6-7 水泥窑 NO_x 排放统计表

统计项目 \ 数据来源	本次标准修订 抽样调查	与 2003 年抽样 调查对比	中国建材院 2009 年数据	欧洲 2004 年监 测数据
水泥窑数量	148	20	9	258
平均排放浓度, mg/m ³	621.5	508.6	868.7	784.9
最大值, mg/m ³	1233	920	1619.5	2040
最小值, mg/m ³	234	105	376.38	145

从 148 个窑的 NO_x 平均排放浓度累计分布看（表 6-8），目前 95% 的水泥窑平均排放浓度在现行标准 800 mg/m³ 以下，近 20% 的水泥窑平均排放浓度控制在 500 mg/m³ 以下，还有 10% 的水泥窑达到了 400 mg/m³ 以下。

表 6-8 水泥窑 NO_x 排放浓度累积分布

比例	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%

浓度 mg/m ³	400	520	554	596	640	685	715	735	780	1233
-------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

在这些调查的水泥窑中，有 45 条线明确报告了采用的 NO_x 控制措施，见表 6-9。有些水泥窑安装了低 NO_x 燃烧器，特别是近年来新建的一些窑，但调查表中并未说明，因此实际采用低 NO_x 燃烧器的水泥窑数量要远多于表 6-9 中的 17 个样本。因采取 NO_x 控制措施，一些企业对 NO_x 原始浓度进行了摸底，有 17 条线提供了数据，原始浓度平均值达 929.1 mg/m³，按此计算各种措施的去除 NO_x 效果。由表可见，即使采用最佳工艺控制措施（低 NO_x 燃烧器+分级燃烧），NO_x 浓度降低到 500 mg/m³ 以下也很困难，平均为 584.6 mg/m³。而采用 SNCR 或工艺控制+SNCR，则可做到 300—500 mg/m³，甚至更低一些。

表 6-9 NO_x 控制措施的采用情况

NO _x 控制措施	样本数	平均排放浓度 mg/m ³	削减效率 %	最大值 mg/m ³	最小值 mg/m ³
原始浓度	17	929.1	—	1827	706
低 NO _x 燃烧器	17	668.1	28.1%	798	525
分级燃烧	6	670.8	27.8%	761	520
低 NO _x 燃烧器+分级燃烧	9	584.6	37.1%	707	470
SNCR	10	384.3	58.6%	475	267
低 NO _x 燃烧器+SNCR	2	260.5	72.0%	273	248
分级燃烧+SNCR	1	234.0	74.8%	—	—

表 6-10 给出了我国有代表性的 4 项水泥窑脱硝示范工程的情况，它们都均采用了 SNCR 技术，一些水泥窑还同时进行了分解窑分级燃烧改造。

表 6-10 国内部分 SNCR 脱硝工程实例

企业	L	X	D	S
规模，吨/天	4500	5000	3500	2500
原始浓度，mg/m ³	—	836	950	784
低氮燃烧后浓度，mg/m ³	794	—	—	—
分级燃烧后浓度，mg/m ³	—	677	—	—
SNCR 后浓度，mg/m ³	273	234	<500	309
综合脱硝效率，%	66	72	50	60.6
还原剂	氨水	氨水	尿素→氨水	氨水
氨逃逸，ppm	3~5	3	—	<10
还原剂消耗量	0.5~0.8 t/h	300~600 L/h	—	3.7kg/t 熟料
投资费用，万元	500	1600	300	850

运行成本, 元/t 熟料	2~3	2.1	2.6	4.4
--------------	-----	-----	-----	-----

SNCR 脱硝效率与喷氨量密切相关, 一般 $\text{NH}_3:\text{NO}$ 为 1 时, 效率在 50—60%, 氨逃逸较少。虽然一些 SNCR 脱硝案例报道的脱硝效率较高, 但考虑到氨逃逸的臭味扰民问题, 以及上游合成氨生产的高能耗、增加 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放 (同样是总量控制指标) 问题, 不宜追求过高脱硝效率, 维持 50% 左右的脱硝效率是合理的。基于这种认识, 确定排放限值如下 (初始浓度按 800—1000 mg/m^3 考虑):

1、一般地区 NO_x 限值 450 mg/m^3 , 与欧盟 BAT 建议的上限值相同。考虑到现有企业工艺改造难度大或不具备改造条件, 仅采取 SNCR (选择性非催化还原) 技术, 要求 50% 左右的效率, 末端治理达标。

2、新建企业及重点地区企业, 要求采取工艺改进 (低氮燃烧器、分解炉分级燃烧等) 和末端治理 (SNCR 技术) 相结合的措施, 达到 NO_x 320 mg/m^3 的限值要求 (工艺改进措施效率取 30% 较为可行, 总体效率 65% 左右)。

3、考虑到我国水泥脱硝刚刚起步, 建成运行的脱硝示范项目均采用 SNCR 技术, SCR (选择性催化还原) 技术在国内尚无成功应用案例。国外也是应用 SNCR 技术较多, SCR 仅有 2—3 套装置在示范运行。因此“十二五”期间水泥窑 NO_x 限值制订是基于 SNCR 技术。未来, 随着 SCR 技术的成熟、可行及环保要求的进一步提高, 可能基于 SCR 技术、SNCR-SCR 复合技术, 实现更严格的排放控制要求。

4、上述限值 (450 mg/m^3 和 320 mg/m^3) 较欧洲大部分国家的标准或许可证限值严苛。欧洲一般要求现有企业 800 mg/m^3 , 新建企业 500 mg/m^3 , 个别企业执行更严格的许可证要求; 德国标准 500 mg/m^3 , 替代燃料使用 60% 以上, 控制在 320 mg/m^3 以下。新建企业及重点地区企业的要求则达到了美国最新排放标准的控制水平。

6.1.4 氟化物

水泥生产中, 如不专门使用含氟矿化剂 (例如萤石) 用于降低烧成温度, 一般窑尾排放的氟化物会很低。

本次标准修订开展的抽样调查, 共获得 69 个有效的水泥窑氟化物排放样本, 平均排放浓度 1.67 mg/m^3 。与 2003 年编制组开展的抽样调查对比, 由于立窑的淘汰, 以及人们对氟化物危害的认识, 排放有了显著削减, 见表 6-11。

表 6-11 水泥窑氟化物排放统计表

统计项目	数据来源	本次标准修订抽样调查	与 2003 年抽样调查对比	
			5 (干法窑)	6 (立窑)
水泥窑数量		69		
平均排放浓度, mg/m^3		1.67	2.48	28.7
最大值, mg/m^3		9.31	5.9	62.56
最小值, mg/m^3		0.013	0.143	6

本次标准修订仍维持 5 mg/m^3 的标准不变, 现状约 95% 的水泥窑可达标, 这也是国际上对氟化物排放的普遍要求。位于重点地区的企业则要求控制在 3 mg/m^3 以下, 达到德国标准的严格程度, 现状约 83% 的水泥窑可达标, 见表 6-12。

表 6-12 水泥窑氟化物排放浓度累积分布

比例	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
浓度	0.07	0.18	0.29	0.7	1	1.54	2.05	2.64	3.9	9.31

mg/m ³										
-------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

6.1.5 NH₃

采用 SNCR、SCR 等二次措施，需要使用尿素、氨水等还原剂，它们喷入适宜温度区间的烟气内与 NO_x 反应，会有部分氨逃逸。根据国家《水泥工业污染防治最佳可行技术指南》（征求意见稿）建议氨逃逸应≤10 mg/m³；在《2012 年国家先进污染防治示范技术名录》中规定，SNCR 脱硝系统氨逃逸浓度应低于 8 mg/m³，SCR 脱硝系统氨逃逸浓度应低于 5 mg/m³。为了防止水泥企业过度使用还原剂造成不必要的浪费，减少臭味扰民，本标准规定在采用 SNCR、SCR 等脱硝技术时，氨逃逸浓度不得高于 8 mg/m³。

编制组收集了一些水泥脱硝工程报道的氨逃逸数据，现场查看了某脱硝装置氨逃逸浓度在线监测情况，正常情况均可控制在 3—5 ppm 以下，几乎没有高于 10 ppm（7.59 mg/m³）的情况，偶尔出现也能很快恢复正常，可以满足本标准的要求。

6.2 烘干机、烘干磨、煤磨、冷却机

熟料冷却机（窑头）、烘干机（磨）、煤磨对物料进行冷却或烘干操作，属一般热力过程。表 6-13 是对这些设备颗粒物排放浓度的统计，冷却机现状使用静电除尘器的较多（占 75%），煤磨、烘干机大多使用布袋除尘器，通常布袋除尘器的除尘效果要更优一些。从达标率统计看，它们中 95% 的设备可以达到现行标准 50 mg/m³ 的要求，70% 的设备可以控制在 30 mg/m³ 以下，40% 的设备可以控制在 20 mg/m³ 以下。

表 6-13 煤磨、冷却机、烘干机颗粒物排放统计表

统计项目 \ 设备	煤磨		冷却机		烘干机	
	布袋	静电	布袋	静电	布袋	静电
样本数量	112	5	14	43	9	1
平均排放浓度, mg/m ³	25.6	40.9	20.0	27.0	32.6	20.1
最大值, mg/m ³	81.1	50	52	81.8	79.6	—
最小值, mg/m ³	0.85	30	3.2	2.2	10.1	—

本次标准修订对一般地区标准提高到 30 mg/m³；对重点地区标准提高到 20 mg/m³。对窑头冷却机，电除尘器可进行提效改造，增加收尘极板面积，或改为布袋、电袋复合；布袋除尘器可使用诺梅克斯（Nomex）滤料或 Nomex 覆膜滤料。煤磨采用抗静电涤纶覆膜滤料。烘干机则采用玻纤覆膜滤料。

6.3 其他通风生产设备

其它通风生产设备，如矿山开采的破碎机；水泥厂的破碎机、磨机、包装机；散装水泥中转站、水泥制品厂的水泥仓除尘，均属于冷态操作过程。除水泥磨外，一般风量较小、废气性质稳定、易于处理，采用布袋除尘是最佳选择。

对 128 个水泥磨样本的颗粒物排放情况进行统计，它们一般采用涤纶滤料，排放浓度从 0.23 mg/m³ 到 57 mg/m³ 不等，平均为 22.2 mg/m³，有 88% 的水泥磨可达到现行标准 30 mg/m³ 要求。标准提高到 20 mg/m³ 后，有 45% 的水泥磨可达标；如重点地区标准提高到 10 mg/m³，仅有 10% 的水泥磨可达标，需要采用涤纶覆膜滤料进行提效改造。

6.4 无组织排放限值

无组织排放是水泥工业大气污染物排放的重要形式。在采矿场、水泥厂、粉磨站、散装水泥中转站、混凝土搅拌站或构件厂，需要对水泥及其他粉、粒状物料进行大量的加工、输送、装卸和贮存操作，一些不合理的设计（如露天堆存）、不完善的设备（如设备密封性差，

造成跑、冒、漏、撒)、不恰当的操作(如过量装载)、不严格的管理(如漏料清扫不及时),都会造成粉尘逸散,恶化厂区及周边环境,需要加强环保监管。

目前的监管方式是对厂界外污染物浓度进行监测。对于颗粒物无组织排放控制,是监测TSP(总悬浮颗粒物)浓度,上风方设参考点,下风方设监控点,扣除背景值后的浓度限值为 1.0 mg/m^3 (小时值)。

本次标准修订收集了厂界外TSP、 PM_{10} 浓度数据(表6-14、表6-15),TSP浓度大约是 PM_{10} 的2倍,约70%的企业界外TSP浓度小于 0.5 mg/m^3 。为加强企业无组织排放控制,改善周边环境质量,TSP标准从现行 1 mg/m^3 加严至 0.5 mg/m^3 。

表6-14 厂界外TSP、 PM_{10} 监控浓度统计表

	TSP	PM_{10}
样本数量	90	25
平均排放浓度, mg/m^3	0.398	0.207
最大值, mg/m^3	1.1	0.53
最小值, mg/m^3	0.042	0.039

表6-15 厂界外TSP、 PM_{10} 浓度累计分布

	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
TSP	0.127	0.183	0.23	0.26	0.297	0.411	0.52	0.60	0.78	1.1
PM_{10}	0.052	0.089	0.097	0.13	0.144	0.21	0.264	0.30	0.41	0.53

企业采取SNCR、SCR脱硝措施后,由于液氨、氨水、尿素等还原剂的储存、使用,存在着恶臭扰民风险,为此需对企业周边 NH_3 浓度进行监控。限值要求按GB14554-93《恶臭污染物排放标准》厂界一级标准执行,为 1 mg/m^3 。某企业脱硝设施运行后监测的厂界 NH_3 浓度为 $0.16\text{--}0.22\text{ mg/m}^3$ 。

6.5 技术与管理规定

6.5.1 颗粒物无组织排放控制

由于水泥工业的粉尘无组织排放问题较为突出,除规定厂(场)界外无组织排放监控点浓度限值外,还需要规定一些有效的技术措施、管理要求,主要是密闭、局部收尘和加强维护管理。

(1) 密闭

密闭是控制粉尘逸散的最有效方法,只要工艺条件允许,应优先采用。例如一些企业的粘土、铁粉、煤炭、混合材露天堆放,应逐步取消;物料输送采取密闭式设备;采用密封式散装房等。

为此标准规定:水泥工业企业的物料处理、输送、装卸、储存过程应当密闭,对块石、粘湿物料、浆料以及车船装卸料过程也可采取其它有效抑尘措施,控制颗粒物无组织排放。

与GB4915-2004标准相比,2005年1月1日后新建厂就要求对物料处理、输送、装卸、储存过程进行密闭,之前的现有厂要求只对“干粉料”密闭。本次标准修订统一要求“密闭”,该规定只对2005年以前的老企业有影响。

(2) 局部收尘

水泥厂中除一些主要通风生产设备有专门的废气收集、处理外,还有各种类型储库的库顶(底)、卸料口、转运点、包装机等众多分散扬尘点,需要设置集尘罩,抽吸含尘气体进行单独或集中处理,将无组织排放转化为有组织排放。

为此标准统一规定：产生大气污染物的生产工艺和装置必须设立局部或整体气体收集系统和净化处理装置，达标排放。这条适用于所有工业行业，因此其他行业大气污染物排放标准中也有相同规定。

6.5.2 净化处理装置与生产工艺设备同步运转的要求

2005 年以前水泥窑的非正常排放（工艺波动，如 CO 预警、温度过高，造成除尘器停运）较为突出，此时的年超标排放量与除尘器正常达标排放量相当，数量十分惊人。为此 GB4915-2004 标准对水泥窑与除尘装置的同步运转率有要求，新建水泥窑要求工艺波动情况下除尘装置仍能正常运转，禁止非正常排放，即除尘装置应与其对应的生产工艺设备 100% 同步运转；现有水泥窑与除尘装置的同步运转率不得小于 99%。

根据工艺自动化、智能化控制技术的进步，本次标准修订不再区分现有水泥窑、新建水泥窑，统一要求 100% 同步运转。由于 2005 年后的新建水泥窑已经按此要求了，因此该规定只对 2005 年以前的老水泥窑有影响。

水泥窑不仅有除尘装置，现在还增加了脱硝装置，其他生产设备也有除尘装置，都应同步运转，因此该项规定在 GB4915-2004 标准的基础上扩展到对所有净化处理装置的要求，规定如下：

净化处理装置应与其对应的生产工艺设备同步运转。应保证在生产工艺设备运行波动情况下净化处理装置仍能正常运转，消除非正常排放。因净化处理装置故障造成事故排放，应采取应急措施使对应的生产工艺设备停止运转，并向当地环境保护行政主管部门报告，待检修完毕后共同投入使用。

6.5.3 排气筒高度要求

GB4915-2004 标准对水泥窑及其他主要通风生产设备（烘干机、烘干磨、煤磨及冷却机）按不同规模规定了排气筒最低允许高度，其目的是保证高烟囱排放的污染物落地浓度符合环境质量要求，原理与《大气污染物综合排放标准》按烟囱高度规定了排放速率（kg/h）相同。由于目前污染物排放浓度显著降低可能不需要如此高的烟囱，污染物地面浓度也不仅受一根排气筒的影响（原标准制订理论存在缺陷），种种情况很复杂，应根据环境影响评价具体分析确定，因此本次标准修订取消了排气筒高度具体规定。

一般在综合及行业大气污染物排放标准中，规定有通用的排气筒高度要求：所有排气筒高度应不低于 15 m。排气筒周围半径 200 m 范围内有建筑物时，排气筒高度还应高出最高建筑物 3 m 以上。由于水泥生产中产尘点很多，大大小小要设置几十根排气筒，除水泥窑、烘干机（窑头）等有限几个主要的通风生产设备排气筒较高外，其他都是一些小的产尘点，对它们也要求高于 200 m 半径范围内建筑物 3 m 是不现实的。因此只对水泥厂最高的窑尾烟囱（一般 80 m 以上，调查的生产线中最高达 130 m）要求高于周围 200 m 半径范围内的最高建筑物 3 m 以上，其他高出本体建筑物 3 m 以上即可。

据此本标准对排气筒高度规定如下：

所有排气筒高度应不低于 15 m，并应高出本体建筑物 3 m 以上。水泥窑及窑磨一体机排气筒周围半径 200 m 范围内有建筑物时，排气筒高度还应高出最高建筑物 3 m 以上。

7 相关排放标准研究

7.1 国外标准

7.1.1 美国 NSPS & NESHAP 标准

美国关于水泥行业大气污染物排放控制的标准有两种，一是针对常规污染物的新源特性标准（NSPS），列入联邦法规典 40 CFR 60 Subpart F（见表 7-1）；另一是针对 189 种空气毒物（Air Toxics，近几年有修订）的危险空气污染物国家排放标准（NESHAP），列入联邦法规典 40 CFR 63 Subpart LLL（见表 7-2）。无论是 NSPS 标准，还是 NESHAP 标准，它们均

是基于污染控制技术而制订的，只是对应污染物不同，选择的控制技术也不同，例如 NSPS 是基于最佳示范技术（BDT），而 NESHAP 则是基于最大可达控制技术（MACT）。

表 7-1 40 CFR 60 Subpart F

受控设施/工艺	污染物	1971.8.17-2008.6.16 建设、重建、改建	2008.6.16 后建 设、重建、改建	说明
水泥窑（包括窑 磨一体机）	PM	0.3 磅/吨生料（干 态）	0.01 磅/吨熟料 （~2mg/m ³ ）	1 磅≈0.454kg，按 每吨熟料 2000 ~ 3000 m ³ 烟气量 计算
	不透光率	20%	20%	
	NO _x	—	1.5 磅/吨熟料 （~300mg/m ³ ）	
	SO ₂	—	0.4 磅/吨熟料 （~80mg/m ³ ）	
熟料冷却机	PM	0.1 磅/吨生料（干 态）	0.01 磅/吨熟料	
	不透光率	10%	10%	
其他 ——原料磨；水 泥磨；原料干燥 机；原料、熟料 及水泥产品贮 库；输送系统转 运点；包装；散 装水泥装卸系统 等	不透光率	10%	10%	

表 7-2 40 CFR 63 Subpart LLL

受控设施/工艺	污染物	现有源	新源（指 2009.5.6 后建设）	说明
水泥窑（包括窑磨一体机）	PM	0.04 磅/吨熟料 (~8 mg/m ³)	0.01 磅/吨熟料 (~2 mg/m ³)	1 磅≈0.454kg, 按每吨熟料 2000 ~ 3000 m ³ 烟气量计算
	二恶英 / 呋喃 (D / F)	0.20 ng/dscm	0.20 ng/dscm	以等当量毒性计, 7%含氧
		或者 0.40 ng/dscm	或者 0.40 ng/dscm	如果在 PM 控制装置入口处, 温度不超过 204°C (400°F)
	汞	55 磅/百万吨熟料 (~10 μg/m ³)	21 磅/百万吨熟料 (~4 μg/m ³)	
	总碳氢 (THC)	24 ppmvd (47 mg/m ³)	24 ppmvd (47 mg/m ³)	以丙烷计, 7%含氧
	HCl	3 ppmvd (5 mg/m ³)	3 ppmvd (5 mg/m ³)	7%含氧
熟料冷却机	PM	0.04 磅/吨熟料	0.01 磅/吨熟料	
原料干燥机	不透光率	10%	10%	
	总碳氢 (THC)	24 ppmvd	24 ppmvd	以丙烷计, 19%含氧
原料磨、水泥磨	不透光率	10%	10%	
原料、熟料及水泥产品贮库; 输送系统转运点; 包装; 散装水泥装卸系统等	不透光率	10%	10%	

利用水泥窑焚烧危险废物执行 40 CFR 63 Subpart EEE 危险废物焚烧的 NESHAP 标准。

7.1.2 欧盟 IPPC 指令及 BAT 指南

除大型燃烧装置 (2001/80/EC)、废物焚烧 (2000/76/EC) 以及 VOCs 排放控制 (1999/13/EC、94/63/EC) 外, 欧盟将工业点源的污染物排放纳入综合污染预防与控制 (IPPC) 指令进行多环境介质 (水体、大气、土壤、噪声等) 的统一管理。如果说前三项是针对通用操作或设备的要求, IPPC 指令则是对典型行业的要求。它将工业生产活动划分为能源工业、金属工业、无机材料工业、化学工业、废物管理以及其它活动 6 大类共 33 个行业, 水泥行业是其中之一。

为配合 IPPC 指令以及许可证制度的实施, 根据各成员国和工业部门信息交流的成果, 欧盟委员会出版了 33 份行业 BAT 参考文件 (BREF)。水泥行业 BAT 文件最初发布于 2001 年 12 月, 最新的文件是 2010 年 5 月, 相应 BAT 排放要求见表 7-3。

表 7-3 欧盟水泥行业 BAT 排放水平

污染物	排放源	BAT 相关排放水平	说明
颗粒物	水泥窑	<10—20 mg/m ³	
	冷却、粉磨	<10—20 mg/m ³	
	其他产尘点	<10 mg/m ³	
NO _x	预热器窑	<200—450 mg/m ³	1、窑况良好时,可实现<350 mg/m ³ ; 200 mg/m ³ 仅三家工厂有过报道。 2、如果采用初级措施/技术后, NO _x >1000 mg/m ³ , 则 BAT 排放水平为 500 mg/m ³ 。
	立波尔窑、长窑	400—800 mg/m ³	基于初始排放水平和氨逸出率。
SO ₂	水泥窑	<50—400 mg/m ³	与原料中 S 含量有关
HCl	水泥窑	<10 mg/m ³	
HF	水泥窑	<1 mg/m ³	
PCDD/F	水泥窑	<0.05—0.1 ng/m ³	
Hg	水泥窑	<0.05 mg/m ³	
Cd+Tl	水泥窑	<0.05 mg/m ³	
As+Sb+Pb+Cr+Co +Cu+Mn+Ni+V	水泥窑	<0.5 mg/m ³	

7.1.3 德国

德国是世界上环保要求最为严格的国家之一。《联邦排放控制法》(Federal Immission Control Act, BImSchG) 是德国大气污染控制的基本法律, 下辖各种条例 BImSchV 和指南 TA Luft。在《空气质量控制技术指南》(Technical Instructions on Air Quality Control, TA Luft) 中规定了大气污染物排放限值。2002 年最新版的 TA Luft 中规定的水泥行业排放要求为: 颗粒物 20 mg/m³、SO₂ 350 mg/m³、NO_x 500 mg/m³ (一般行业为 350 mg/m³)、氟化物 3 mg/m³。

对于水泥窑共处置固体废物, 执行关于废物焚烧和共焚烧的 17.BImSchV 条例要求。该条例要求较 TA Luft 更加严格, 如颗粒物控制在 10 mg/m³, SO₂ 为 50 mg/m³, NO_x 为 200 mg/m³。按掺烧废物比例, 计算应执行的标准, 如掺烧 60%的废物, NO_x 执行的标准值为 (500×0.4+200×0.6) = 320 mg/m³。

7.1.4 日本

日本是按污染物项目制订排放标准, 而不是按行业, 类似我国的《大气污染物综合排放标准》。其排放标准包括两种情况, 一是对于二氧化硫, 按各个地区实行 K 值控制, 同时配合燃料 S 含量限制。K 值标准是基于大气扩散模式, 根据 SO₂ 环境质量要求、排气筒有效高度确定 SO₂ 许可排放量。K 值与各个地区的自然环境条件、污染状况有关, 需要划分区域确定 K 值。

二是对于烟尘、粉尘 (含石棉尘)、有害物质 (Cd 及其化合物、Cl₂、HCl、氟化物、Pb 及其化合物、NO_x)、28 种指定物质, 以及 234 种空气毒物 (其中 22 种需要优先采取行动), 由国家制定统一的排放标准。目前对空气毒物完成了苯、三氯乙烯、四氯乙烯、二恶英 4 项标准制订工作。

可见对某一行业的大气排放要求分散在不同的污染物项目标准里。一些污染物项目在制订排放限值时考虑了行业差异，以 NO_x 为例，区分了锅炉、熔炼炉、加热炉、水泥窑等，排放浓度限值从 60 ppm（燃气锅炉）到 800 ppm（电子玻璃熔炉）不等。

表 7-4 为日本水泥工业执行的大气排放标准。

表 7-4 日本水泥工业执行的大气污染物排放限值

颗粒物	SO ₂	NO _x
一般地区 100 mg/m ³ 特殊地区 50 mg/m ³	K 值法	250 / 350 ppm (500 / 700 mg/m ³)

7.2 地方标准

我国一些省级人民政府制定了更严格的地方水泥工业排放标准，如北京市从 2007 年、广东省从 2012 年分别开始执行 NO_x 500 或 550 mg/m³ 的严格限值，走在了全国前列。福建、重庆等省、直辖市也在抓紧制定地方标准。见表 7-5。

表 7-5 部分省、直辖市地方水泥工业排放标准

省市	标准号	区域	实施日期	NO _x	PM	SO ₂	F
北京市	DB11/237-2004	A 区	2007.1.1	禁排	禁排	禁排	禁排
		B 区	2007.1.1	500	30	30	2
广东省	DB44/818-2010	A 区	2012.1.1	550	30	100	3
		B 区	2014.1.1				
福建省	报批稿	所有	2014.1.1	400	30	100	5
重庆市	报批稿	主城区	2013.1.1	250	15	150	—
		影响区	2013.1.1	350	30	200	—
		其他区域	2013.1.1	550	50	200	—

杭州市下发文件《杭州市燃煤电厂（热电）和水泥熟料脱硝工程实施计划》，要求水泥窑 NO_x 控制在 150 mg/m³ 以下。

8 实施本标准在经济成本与环境效益分析

8.1 实施本标准的经济成本

8.1.1 现有生产线达标改造成本

按 2011 年水泥产量 20.9 亿吨计，落后立窑约有 2 亿吨产量（占 10%）。根据《水泥工业“十二五”发展规划》，“十二五”需要淘汰落后产能 2.5 亿吨，按立窑全部淘汰，还需要淘汰 0.5 亿吨回转窑水泥，由于干法中空窑、立波尔窑、湿法窑已很少，或有特殊需要（如生产特种水泥或用于资源综合利用），主要是通过淘汰 2000 吨/天以下的一些小规模新型干法水泥来完成（如 700 吨/天、1000 吨/天），计 120 条左右（约 3700 万吨/年熟料产能）。剩余的 18.4 亿吨水泥产量约 1400 条生产线（含少量其他回转窑）需进行达标改造。

（1）颗粒物达标改造

按照现有企业除尘器选型的三种类型组合：

a) 窑头电除尘器+窑尾电除尘器+通风设备用脉冲袋除尘器；

- b) 窑头电除尘器+窑尾袋除尘器+通风设备用脉冲袋除尘器;
- c) 窑头袋除尘器+窑尾袋除尘器+通风设备用脉冲袋除尘器。

三种类型组合的达标改造投资折合为“日产吨熟料”分别为 3418 元、2310 元和 949 元，按三种组合各占 1/3，平均的达标改造投资为 2226 元/（吨/天）。

按 2011 年新型干法水泥生产线统计（表 2-2），有 14 亿吨熟料产能需要提效改造，全国改造费用约 100 亿元。按目前平均单线规模 3000 吨/天计，单线除尘系统改造费用平均为 700 多万元。

（2）NO_x 达标改造

现有水泥生产线安装 SNCR 脱硝装置，单线投资约 500 万元（不进行工艺改造），预计全国安装费用约 70 亿元。

两项合计现有生产线达标改造成本约 170 亿元。

8.1.2 新建生产线环保投资

《水泥工业“十二五”发展规划》预测“十二五”末水泥需求量 22 亿吨/年，由于需要淘汰 2.5 亿吨落后产能，还需要在 2011 年 20.9 亿吨水泥产量的基础上新增产量 3.6 亿吨，据此需要建设 160 条 5000 吨/天新型干法生产线（约 2.5 亿吨/年熟料产能）。按单线除尘系统投资 3500 万元、低 NO_x 燃烧器+分级燃烧+SNCR 脱硝投资 800 万元计算，则全国新建生产线环保投资约 70 亿元。

水泥企业执行现行标准，全线环保投资约占总投资的 8—10%，标准提高后（颗粒物 50/30→30/20 mg/m³；水泥窑脱硝），需要增加环保投资，相应环保投资比例提高至 10—12%。

8.1.3 年运行费用

目前水泥企业环保设施运行成本约 8—10 元/吨水泥，颗粒物标准提高后，将增加除尘成本 1—2 元/吨水泥，脱硝新增运行成本 3—4 元/吨水泥，合计运行成本将达到 12—15 元/吨水泥。按年产 20 亿吨水泥计算，全国环保设施运行成本将达到 240—300 亿元。

8.2 实施本标准的环境（减排）效益

污染物削减效益由三部分构成：1) 淘汰 2.5 亿吨落后产能削减的污染物质；2) 现有生产线（18.4 亿吨水泥/年）提标改造削减的污染物质；3) 新建生产线（新增 3.6 亿吨水泥产能）增加的污染物质。

颗粒物削减：现行标准可将吨水泥颗粒物排放控制在 1kg/t 以下，提标后相应可控制在 0.6 kg/t 以下。因此测算：淘汰落后产能削减粉尘量 25 万吨、提标改造削减粉尘量 73.6 万吨、新增粉尘量 21.6 万吨，合计年减排颗粒物 77 万吨。较目前削减了 38.5%。

NO_x 削减：现行标准可将 NO_x 排放控制在 1.6 kg/t 熟料（新型干法），提标后 NO_x 可控制在 0.64—0.9 kg/t 熟料，立窑 NO_x 排放量低，可忽略。据此测算，淘汰 3700 万吨新型干法熟料产能，削减 NO_x 约 6 万吨；14 亿吨新型干法熟料产能提标改造，削减 NO_x 约 98 万吨；新增 2.5 亿吨新型干法熟料产能，增加 NO_x 约 16 万吨，合计年减排 NO_x 约 88 万吨。较目前（224 万吨）削减了 39.3%，可实现“十二五”节能减排规划确定的到 2015 年 NO_x 控制在 150 万吨的目标。