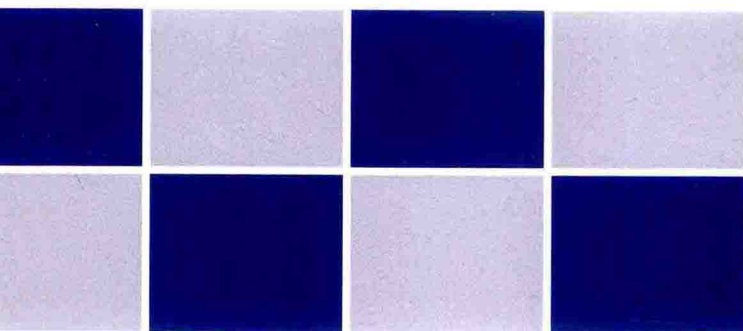


SHUINI HANGYE WURANWU
ZONGHE KONGZHI JISHU



水泥行业污染物

综合控制技术

主 编 郑志侠
副主编 刘 鹏 吴 刚 盛赵宝

中国环境出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

水泥行业污染物综合控制技术

郑志侠 主 编

刘 鹏 吴 刚 盛赵宝 副主编

中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

水泥行业污染物综合控制技术/郑志侠主编. —北京:
中国环境出版社, 2015.4

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书)

ISBN 978-7-5111-2332-9

I. ①水… II. ①郑… III. ①水泥工业—污染
控制—研究—中国 IV. ①X781.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第069769号

出 版 人 王新程
责任编辑 董蓓蓓 沈 建
责任校对 尹 芳
封面设计 宋 瑞
封面摄影 袁山东

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街16号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2015年7月第1版
印 次 2015年7月第1次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 10.5
字 数 230千字
定 价 48.00元

【版权所有。未经许可,请勿翻印、转载,违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题,请寄回本社更换

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

编 委 会

顾 问：吴晓青

组 长：赵英民

副组长：刘志全

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

《水泥行业污染物综合控制技术》

编 委 会

主 编 郑志侠

副 主 编 刘 鹏 吴 刚 盛赵宝

成 员（以姓氏拼音为序）

穆璐莹 施 勇 汪水兵 王 健

杨旺生 易明建 张 红

序 言

我国作为一个发展中的人口大国，资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作，提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念新举措。在科学发展观的指导下，环境保护工作成效显著，在经济增长超过预期的情况下，主要污染物减排任务超额完成，环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长，资源环境约束进一步强化，环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减，环境质量改善的压力不断加大，防范环境风险的压力持续增加，确保核与辐射安全的压力继续加大，应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难题，解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题，确保环保工作不断上台阶出亮点，必须充分依靠科技创新和科技进步，构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年，我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》（以下简称《规划纲要》），提出了建设创新型国家战略，科技事业进入了发展的快车道，环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求，原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会，出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》，确立了科技兴环保战略；2012年，环境保护部召开第二次全国环保科技大会，出台了《关于加快完善环保科技标准体系的意见》，全面实施科技兴环保战略，建设满足环境优化经济发展需要、符合我国基本国情和世界环保事业发展趋势的环境科技创新体系、环保标准体系、环境技术管理体系、环保产业培育体系和科技支撑保障体系。几年来，在广大环境科技工作者的努力下，水污染控制与治理科技重大专项实施顺利，科技投入持续增加，科技创新能力显著增强，

现行国家标准达 1 300 余项，环境标准体系建设实现了跨越式发展；完成了 100 余项环保技术文件的制修订工作，确立了技术指导、评估和示范为主要内容的管理框架。环境科技为全面完成环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构，支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动，“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技部的总体部署，环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护科技发展规划》确定的重点领域和优先主题，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”以来，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目 439 项，涉及大气、水、生态、土壤、固体废物、核与辐射等领域，共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，提出了一系列控制污染和改善环境质量的技术方案，形成了一批环境监测预警和监督管理技术体系，研发出了一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术，提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议，为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”以来环保公益性行业科研专项项目研究成果，及时总结项目组织管理经验，环境保护部科技标准司组织出版环保公益性行业科研专项经费系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希望通过这一尝试，能够进一步活跃环保科技的学术氛围，促进科技成果的转化与应用，为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青

2011 年 10 月

前 言

我国水泥产量已连续多年居世界第一位，占世界水泥总产量的 50% 左右。如此大规模的水泥生产所带来的环境负荷不容小觑。安徽省环境科学研究院、合肥水泥研究设计院、安徽海螺集团有限责任公司根据多年在水泥行业污染物治理领域积累的经验及研究成果，编写了这本《水泥行业污染物综合控制技术》。

水泥行业污染物排放种类多，是一个高污染、高能耗行业。其中，水泥生产中粉尘的排放一直以来都是水泥行业治理的重点。然而，水泥行业氮氧化物的排放量也非常大，仅次于电力行业和机动车尾气，随着国家大气环境形势日益严峻，氮氧化物也引起了人们的广泛关注。近年来，随着水泥窑协同处置废弃物技术的快速发展，焚烧处理城市生活垃圾和城市污泥工艺在国内外得到了广泛应用。因此，本书的重点内容主要包括水泥行业粉尘、氮氧化物的控制技术、水泥窑协同处置城市生活垃圾及城市污泥等，同时补充介绍其他污染物的控制方法。

全书共包括水泥行业基本情况、大气污染物控制技术、水泥窑协同处置固体废物等内容。参加编写的有安徽省环境科学研究院的郑志侠、刘鹏、张红、汪水兵、易明建等；合肥水泥研究设计院的吴刚、穆璐莹、施勇、王健等；安徽海螺集团有限责任公司的盛赵宝、杨旺生等。第 1 章“概述”，介绍水泥基本知识，分析污染物控制现状、行业发展情况及存在的问题等，由安徽省环境科学研究院编写；第 2 章“水泥行业粉尘控制技术”，主要介绍水泥生产过程中粉尘的产生及现有的主要控制技术，由合肥水泥研究设计院编写；第 3 章“水泥行业氮氧化物控制技术”，分析水泥行业氮氧化物的产生机理，综述低氮燃烧技术和烟气脱硝技术，并辅以工程实例，由安徽省环境科学研究院和安徽海螺集团有限责任公司编写；第 4 章“水泥窑协同处置固体废物”，重点介绍水泥窑处置城市生活垃圾及城市污泥，由安徽省环境科学研究院和安徽海螺集团有限责任公司编写；第 5 章“水泥行业其他污染物排放控制”，介绍水泥行业二氧

化硫、氟化物及二噁英等污染物的控制，由安徽省环境科学研究院编写。全书由刘鹏整理，郑志侠审阅统一定稿。

本书在编写过程中，结合图表和工程实例进行论述，力求系统和完整，但由于本书涉及的内容比较广泛，工作量大，且编者水平有限，书中难免有错误和疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2014年12月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 水泥基本知识	1
1.2 水泥行业发展情况分析	2
1.3 水泥行业污染控制现状	5
1.4 水泥行业面临的主要问题	13
第 2 章 水泥行业粉尘控制技术	18
2.1 水泥生产过程中粉尘的产生	18
2.2 水泥工业粉尘控制技术概述	27
2.3 旋风除尘器	29
2.4 袋式除尘器	34
2.5 电除尘器	47
2.6 其他除尘技术	54
2.7 水泥行业除尘技术比较	61
第 3 章 水泥行业氮氧化物控制技术	70
3.1 氮氧化物简介	70
3.2 水泥行业氮氧化物减排政策及排放标准	73
3.3 水泥窑氮氧化物的产生	75
3.4 水泥窑氮氧化物控制技术概述	80
3.5 水泥窑低氮燃烧技术	82
3.6 SNCR 脱硝技术	93
3.7 SCR 脱硝技术	106
3.8 其他烟气脱硝技术	113
3.9 水泥窑烟气脱硝技术比较	114

第4章 水泥窑协同处置固体废物	117
4.1 我国城市生活垃圾的特点	117
4.2 城市生活垃圾处理处置方法	118
4.3 水泥窑协同处置城市生活垃圾的优势	122
4.4 国内外利用水泥窑协同处置城市生活垃圾的现状	127
4.5 新型干法水泥窑综合处置城市生活垃圾工程实例	133
4.6 水泥窑协同处置城市污泥	139
第5章 水泥行业其他污染物排放控制	146
5.1 二氧化硫	146
5.2 氟化物	149
5.3 二噁英	152
参考文献	155
后 记	158

第 1 章 概述

“十二五”是我国经济发展方式转变的重要时期，节能减排、低碳化是产业体系和消费模式的主要特征。水泥行业不单是我国国民经济建设的重要基础材料产业，也是主要的能源、资源消耗和污染物排放行业之一。根据工信部节[2010]582 号《工业和信息化部关于水泥工业节能减排的指导意见》，到“十二五”末，全国水泥生产平均可比熟料综合能耗（以标煤计）小于 114 kg/t，这对水泥行业的发展提出了新的要求和挑战。在此，本章主要针对水泥行业污染物控制现状、行业发展情况及存在的问题等进行介绍。

1.1 水泥基本知识

凡细磨成粉末状，加入适量水后，可成为塑性浆体，既能在空气中硬化，又能在水中硬化，并能将砂、石等材料牢固地胶结在一起的水硬性胶凝材料，通称为水泥。水泥诞生于 1824 年，是最重要的建筑材料之一。水泥种类繁多，按其矿物组成可分为硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、氟铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥等；而按其用途和性能又可分为通用水泥、专用水泥和特种水泥三大类。每一品种的水泥，根据其胶结强度的大小，可分为不同强度等级。不同品种及强度等级的水泥，其性能差异较大。

水泥生产一般可以分为生料磨制、煅烧和水泥制成 3 个工序，简单介绍如下：

（1）生料磨制

生料磨制，顾名思义，即将石灰石、黏土等原料利用磨机进行磨细的工序，分为干法磨制和湿法磨制两种。干法磨制一般采用闭路操作系统，即原料经磨机磨细后，进入选粉机分选，粗粉回流入磨再进行粉磨操作，并且多数采用物料在磨机内同时烘干并粉磨的工艺，所用设备有管磨、中卸磨及辊式磨等；湿法磨制通常采用管磨、棒磨等一次通过磨机不再回流的开路系统，但也有采用带分级机或弧形筛等闭路系统的。

（2）煅烧

即把已加工的原料放入水泥窑内煅烧。煅烧熟料的设备主要有立窑和回转窑两类：

1) 立窑

筒体立置不转动的水泥窑称为立窑，分普通立窑和机械立窑。普通立窑是人工加料和人工卸料，或机械加料和人工卸料；机械立窑是机械加料和机械卸料。机械立窑是连续操

作的，它的产量、质量及劳动生产率都比普通立窑高。按照国家政策要求，国内大多数立窑已被回转窑取代，目前 95% 以上的熟料由新型干法回转窑所生产。

2) 回转窑

筒体卧置（略带斜度，约为 3%），并能做回转运动的水泥窑称为回转窑。回转窑分煅烧生料粉的干法窑和煅烧料浆（含水量通常为 35% 左右）的湿法窑。

① 干法窑。

干法窑又可以分为中空式窑、余热锅炉窑、悬浮预热器窑和悬浮分解炉窑。20 世纪 70 年代前后，发展了一种可大幅度提高回转窑产量的煅烧工艺——窑外分解技术，其特点是采用了预分解窑，它以悬浮预热器窑为基础，在预热器与窑之间增设了解析炉。在解析炉中加入占总燃料用量 50%~60% 的燃料，使燃料燃烧、生料预热和碳酸盐分解等过程从窑内传热效率较低的地带移到解析炉中进行，生料在悬浮状态或沸腾状态下与热气流进行热交换，从而提高传热效率，使生料在入窑前的碳酸钙分解率达 90% 以上，达到减轻窑的热负荷、延长窑衬使用寿命和窑的运转周期、在保证窑发热能力的前提下大幅度提高产量的目的。

② 湿法窑。

用于湿法生产中的水泥窑称湿法窑，可分为湿法长窑和带料浆蒸发机的湿法短窑。湿法生产是将生料制成含水率为 35% 左右的浆料。由于制备成具有流动性的泥浆，所以各原料之间混合好，生料成分均匀，使烧成的熟料质量高，这是湿法生产的主要优点。但由于湿法窑能耗高、产量低等因素，目前也已经被新型干法预分解窑所淘汰。

(3) 水泥制成

经过煅烧后的熟料再经过粉磨即可制成水泥。水泥粉磨分为开路磨与闭路磨，闭路磨生产工艺使用较多，但为了防止生产中粉尘飞扬，粉末系统均装有除尘设备。

1.2 水泥行业发展情况分析

1.2.1 水泥产能变化情况

随着我国经济的快速发展，水泥在国民经济中的作用越来越大。改革开放以来，我国水泥行业快速发展，已连续多年居世界第 1 位，水泥产量占世界总产量的 50% 左右。水泥行业的快速发展，基本满足了我国国民经济持续快速发展和大规模经济建设的需要。

2013 年，我国水泥产量达到了 24.1 亿 t（图 1-1），同比增长 9.6%，增速比 2012 年的 7.4% 提升了 2.2 个百分点。全国熟料产量 13.6 亿 t，同比增长 5.6%，低于水泥产量增速。全国新增熟料产能 0.94 亿 t，较 2012 年新增产能 1.6 亿 t 明显回落。全国水泥行业固定资产投资完成 1 421 亿元，同比继续下滑 6.5%。持续回落的水泥行业固定资产投资数据显示未来行业供给端压力在继续减轻。

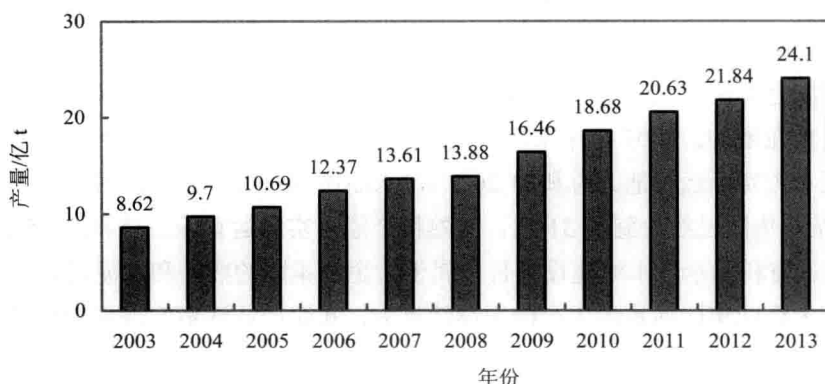


图 1-1 2000—2013 年中国水泥产量走势

数据引自：中国水泥网信息中心。

1.2.2 水泥产业结构变化情况

2003 年，我国新型干法生产线处于初级发展阶段，新型干法熟料生产能力比重不到全国熟料总产能的 20%，其中 4 000 t/d 及以上生产线实际运营能力仅占新型干法总运营能力的 25.2%，新型干法生产线平均生产规模为 1 800 t/d。近十年来，随着我国新型干法技术的逐渐成熟、技术水平的不断提高以及水泥产业化进程的不断推进，新型干法技术得到了长足发展，到 2013 年年末，新型干法熟料产能占全国熟料总产能的比重已超过 95%，4 000 t/d 及以上生产线实际运营能力所占比重已超过全国新型干法熟料总运营能力的 60%，其中 10 000 t/d 级生产线有 11 条，新型干法生产线平均生产规模达到 3 300 t/d。水泥生产线大型化趋势愈加明显（图 1-2）。

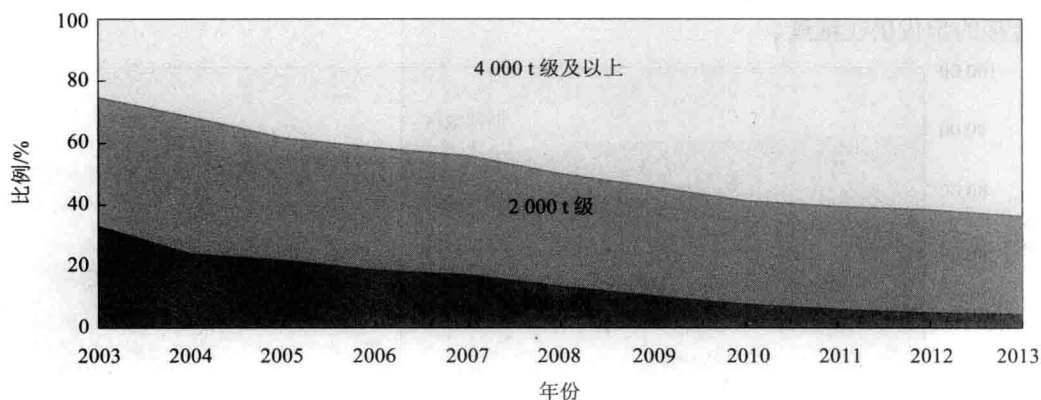


图 1-2 中国新型干法生产线日产规模构成情况

数据引自：水泥行业十年产能变动情况分析。

2003—2013 年我国水泥制造业固定资产投资平均累计增速 30.8%，规模以上水泥生产企业数量大幅增加。产能的快速增长加大了水泥企业间的市场竞争，企业的兼并重组和规模化扩张速度随之加快，水泥生产技术水平进一步提高，产能较大、技术水平较高的大企业集团的数量也在增加。2007 年年末，水泥年产规模超过 1 000 万 t 的企业集团有 11 家，其熟料生产能力占实际运营能力总和的 20.3%，水泥占 36.0%，而目前水泥年产规模超过 1 000 万 t 的企业集团已经达到了 31 家，其熟料产能占实际运营能力总和的 65.2%，水泥占 47.7%。统计资料显示，水泥建设项目中属于大企业集团的熟料和水泥设计产能比重均已超过 40%，大企业集团的水泥生产能力继续扩大，水泥产业逐步实现规模化升级，开始了从数量规模型向质量效益型转变。

1.2.3 水泥产业布局变化情况

近年来，水泥行业重组整合加速开展，区域性龙头企业在行业的地位将进一步加强，水泥行业的重组也将愈演愈烈。水泥行业的联合重组将以形成区域龙头企业为主：一方面，国内有实力的水泥企业对目标市场周边的中小水泥企业进行各种层次的“联合”，以期形成区域水泥龙头企业；另一方面，外资水泥巨头在国内水泥市场积极布局设点，对国内水泥企业形成压力，加速上述区域龙头企业进一步联合重组的步伐。大中型企业在市场中拥有更大的市场份额，小型企业生存空间进一步缩小，区域市场龙头将占有区域内主要市场份额。

随着国家西部大开发和中部崛起战略的不断推进，政府对中西部地区投资逐渐加大，从“十五”开始，水泥产业出现明显的向中西部地区转移的趋势（图 1-3）。2006 年东部地区水泥产能占 50.6%，超过全国的一半；到 2013 年，东部地区水泥产能下降到 36.8%，中、西部水泥产能比重分别提高 3.8 个和 9.7 个百分点。目前统计的水泥熟料生产线建设项目中，中西部地区建设项目设计能力占建设项目设计总能力的近 90%，水泥产业向中西部地区转移的步伐仍在继续。

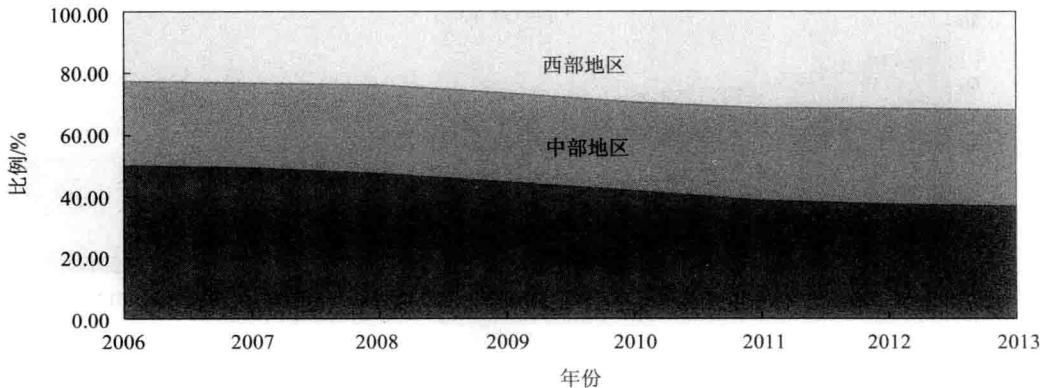


图 1-3 中国水泥产能分地区比重变化情况

数据引自：水泥行业十年产能变动情况分析。

1.2.4 水泥行业发展趋势

我国水泥行业经过近十年的迅猛发展,其产量已经占据世界水泥产量的半壁江山。尽管近年我国水泥行业景气度有所下降,但长期来看,随着工业化、城镇化和新农村建设的进一步拉动内需,保障性安居工程以及基础设施建设将带动水泥需求持续平稳增长。我国水泥行业面临着发展机遇,同时也面临着更大的挑战,我国水泥行业发展趋势如下:

目前,国内仍存在一定量以立窑和小粉磨站为代表的落后生产工艺,同时,一批早期建设的中小规模预分解生产线的装备水平已相对落后。《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》重点提出“坚持把建设资源节约型、环境友好型社会作为加快转变经济发展方式的重要着力点”,在这一大环境下,水泥行业节能减排是大势所趋。水泥行业要适应市场需求变化,必须顺应科技进步新趋势,健全节能减排激励约束机制。

国内水泥产能过剩、市场竞争愈加激烈已是不争的事实。水泥行业的利润空间被压缩,要进一步满足国民经济建设的需求,适应现代建筑业的发展要求,适应市场需求的变化,提高行业效益水平,就必须大力发展加工制品业,由产品生产向应用服务转型,成为结构工程问题系统解决方案的供应商和服务商。大力发展适合现代建筑业需要的高品质的水泥深加工产品,不仅有利于改变单纯追求规模和数量的传统发展模式,也有利于提升行业的整体竞争力和获利空间。因此,大力发展循环经济、延长国内水泥行业上下游产业链是国内水泥行业的发展理念,通过内生和外延式发展,积极拓宽发展空间。

国内水泥行业不再以新增生产能力为主导,要引导行业由以增量和平行推广现有成熟技术为主,向通过推进技术进步实现产业结构优化升级为主的发展模式转变,由单纯追求产能规模的扩张转向追求质量和效益的提升转变,由粗放式无序竞争转向规范有序的竞争转变,通过淘汰落后产能、发展先进、有核心竞争力的产能,提高产品质量及行业运行效益,从而形成限制淘汰一批、改造提升一批、发展培育一批企业,而达到提升产业层次的目的。

新型干法工艺的发展过多地集中在对成熟工艺技术和成熟的国产化装备的平行推广上,而新一代的技术创新和更高层面的技术提升没有引起足够的重视。2012年以来,我国水泥行业全面进入技术结构升级阶段,水泥行业应通过加快推进自主创新,构建可持续发展的技术支撑体系,全面推进现代化的进程。自主创新能力是全面提升行业企业发展内在动力的决定性因素,谁拥有了自主创新能力,谁就能在激烈的市场竞争中把握先机赢得主动。因此,企业在技术创新中的主体作用是国内水泥行业的发展趋势之一。

1.3 水泥行业污染控制现状

1.3.1 水泥行业污染控制要求

水泥行业废气排放带来的粉尘、二氧化硫、氮氧化物等污染物对环境影响较大,世界

各国根据自身的情况制定了不同的水泥行业大气污染物排放标准。我国与世界主要发达国家的水泥行业大气排放标准见表 1-1。

表 1-1 中国与世界主要发达国家的水泥行业大气污染物排放标准（标态） 单位：mg/m³

排放物	美国	日本	德国	欧盟（2000/76/EC）	中国
NO ₂	230	360	200/400 ^①	800/500 ^②	400/320 ^③
SO ₂	200	200	<400	200	200
CO	100	100	100	90	
HF	—	5	5	1	5
HCl	—	30	30	10	
Pb			5	1.0（Tl+Cd+Pb+As 计）	
Cu			5	0.5（Be+Cr+Sn+Sb+Cu+Mn+Ni+V）	
Hg	—	—	0.2	0.05	0.05
Ti	0.1		5		
粉尘	50	30~100	15~25	30	30

注：① 替代燃料大于 60%执行 200 mg/m³，其余执行 400 mg/m³；

② 2008 年 1 月 1 日新建厂执行 500 mg/m³；

③ 重点地区执行 320 mg/m³。

我国早在 1985 年就首次发布了《水泥工业污染物排放标准》（GB 4915—1985），1996 年进行了第一次修订，2004 年第二次修订，2013 年第三次修订。第三次修订的主要内容包 括：① 适用范围在原有水泥原料矿山开采、水泥制造、水泥制品生产的基础上，增加了散装水泥中转站；② 调整现有企业、新建企业大气污染物排放限值，增加适用于重点地区的大气污染物特别排放限值；③ 利用水泥窑协同处置固体废物的，明确要求除执行本标准外还应执行相应的污染控制标准。

2013 年修订的标准（GB 4915—2013）重点提高了颗粒物、氮氧化物（NO_x）的排放控制要求。根据除尘脱硝技术的进步，新标准将颗粒物排放限值由原标准的 50 mg/m³（水泥窑等热力设备）、30 mg/m³（水泥磨等通风设备）收严至 30 mg/m³、20 mg/m³；将氮氧化物的排放限值由 800 mg/m³ 收严到 400 mg/m³。考虑到现有企业需要进行脱硝除尘改造，标准规定新建企业自 2014 年 3 月 1 日起执行新的排放限值，现有企业则在标准发布后给予一年半过渡期，过渡期内仍执行原标准，到 2015 年 7 月 1 日后执行新标准。

新标准在原有污染物控制项目（PM、SO₂、NO_x、氟化物）的基础上增加了氨（NH₃）和汞（Hg）控制项目。氨排放是水泥窑烟气脱硝衍生出的污染问题，为防止氨逃逸导致环境空气中细颗粒物浓度上升，标准规定使用氨水、尿素等含氨物质作为还原剂去除烟气中氮氧化物时需执行氨排放限值。鉴于水泥生产大量使用燃煤、粉煤灰作为燃料和原料，为强化重金属污染风险防范、切实履行环保国际公约，新标准还规定了汞排放限值。