

附件 5

《水泥窑协同处置危险废物污染控制标准》

编制说明

(征求意见稿)

《水泥窑协同处置危险废物污染控制标准》标准编制组

2012 年 10 月

项目名称：水泥窑协同处置危险废物污染控制标准

项目统一编号：484

编制单位：中国环境科学研究院、中国建筑材料研究总院、北京金隅红树林环保技术有限责任公司

编制组主要成员：

中国环境科学研究院固体废物污染控制技术研究所：王琪，黄启飞，闫大海，蔡木林，杨玉飞，李丽，黄泽春

中国建筑材料科学研究总院：何捷，萧瑛

北京金隅红树林环保技术有限责任公司起草：赵启刚，熊运贵，孙伟舰

标准所技术管理负责人：王宗爽

标准所技术管理承办人：李琴

标准处项目负责人：谷雪景

目 录

1	项目背景	1
1.1	任务来源	1
1.2	主要工作过程	1
2	行业概况	1
2.1	我国水泥工业现状	1
2.2	我国水泥窑协同处置技术发展现状	3
2.3	其他国家和地区水泥窑协同处置技术发展现状	7
3	标准制订的必要性分析	11
3.1	国家及环保主管部门的相关要求	11
3.2	国家相关产业政策及行业发展规划中的环保要求	11
3.3	行业发展带来的主要环境问题	12
3.4	现行相关标准存在的主要问题	12
4	编制依据	13
5	编制原则	14
6	水泥窑协同处置污染节点分析与控制方法	14
6.1	前端控制节点与控制方法	15
6.2	末端控制节点与控制方法	16
7	标准内容结构	18
8	主要条文说明	18
8.1	适用范围	18
8.2	规范性引用文件	19
8.3	术语与定义	19
8.4	协同处置设施	20
8.5	入窑协同处置危险废物特性	22
8.6	运行技术要求	24
8.7	大气污染物排放限值	25
9	监测要求	39
9.1	尾气监测	39
9.2	水泥产品检测	40
9.3	水泥窑协同处置设施的性能测试	41
10	主要国家、地区及国际组织相关标准研究	41
10.1	我国水泥窑烟气排放标准	41
10.2	国外水泥窑协同处置危险废物的标准与法规	43
10.3	本标准与主要国家、地区及国际组织同类标准的对比	56
11	实施本标准的环境效益及经济技术分析	56
11.1	实施本标准的环境（减排）效益	56
11.2	实施本标准的经济技术分析	58
11.3	对实施本标准的建议	59

1 项目背景

1.1 任务来源

目前，我国利用水泥窑协同处置危险废物的发展需求越来越大，我国现有的污染控制标准主要是参照《危险废物焚烧污染控制标准》(GB18484-2001)和《水泥工业大气污染物排放标准》(GB4915-2004)的相关条文执行，已不能满足水泥窑协同处置危险废物的污染控制要求。因此，2006年6月，环境保护部科技标准司向中国环境科学研究院下达了《固体废物共处置污染控制标准》的编制任务(项目统一编号：484)，由中国环境科学研究院固体废物污染控制技术研究所、中国建筑材料科学研究总院和北京金隅红树林环保技术有限责任公司等单位负责标准的制定工作。

1.2 主要工作过程

编制工作承担单位在工作过程中广泛收集、分析了国内外相关资料，深入水泥企业进行了现场调查研究，依托环境保护部对外合作中心委托的中挪合作“中国危险废物与工业废物水泥窑协同处置环境无害化管理项目”，选择典型危险废物在水泥窑中进行了试烧试验和污染物监测评价，同时针对具体问题在实验室内进行了大量实验研究。在充分利用已经取得的科研成果的基础上，并征求参编单位和有关专家的意见，经过反复修改和完善，形成了标准开题报告和标准草案。2009年11月25日，环保部科技标准司组织召开标准开题论证会，根据开题论证会意见及专家研讨会意见修改完善后形成了《水泥窑协同处置危险废物污染控制标准》(征求意见稿)。

2 行业概况

2.1 我国水泥工业现状

2011年，我国水泥年产量达20.8亿吨，超过世界水泥总产量的50%。水泥企业数量约4000家，企业数量众多。近两年来，各集团公司加大了兼并重组的步伐，产业集中度有所提高。截至2011年，全国水泥产量前十位的集团公司产量已占全国水泥总产量的40%以上。

我国水泥生产线类型主要为新型干法窑和立窑两种。立窑属于淘汰窑型，单线熟料产量低，一般小于300吨/天，最大500-700吨/天，2010年我国立窑熟料产量占熟料总产量的20%，2012年底立窑在我国将基本淘汰。新型干法窑是目

前最先进的水泥生产线，单线规模 700-10000 吨/天，2009 年我国各规模新型干法窑数量如表 2-1 所示，可以看出，2000 吨/天以上规模的新型干法窑数量已占新型干法窑总数的 69%。目前我国新型干法窑数量仍在逐年增加，2011 年已超过 1530 条，占熟料总产量的 80%以上，其中 4000-5500 吨/天新型干法窑数量占新型干法窑总量的 48.3%，为火力窑型。

表 2-1 我国新型干法窑（2009 年）

生产线规模（吨/天）	数量（条）	比例（%）
700-900	41	3.7
1000	151	13.6
1100-1800	152	13.7
2000	76	6.8
2500-3500	377	33.9
4000-4500	46	4.1
≥5000	270	24.3
合计	1113	100

2011 年水泥工业能源消耗总量已达到 2.2 亿吨。水泥工业的能源结构以燃煤为主，煤炭占水泥生产所消耗能源的 85%左右。水泥工业年消耗原煤 1.9 亿吨左右，电力消耗折合标煤所占比例 10%左右，其它燃料占 1%-2%，其中新型干法窑主要使用的是烟煤，立窑使用的是无烟煤。水泥生产的主要原料是石灰石，2009 年我国水泥企业消耗石灰石 14 亿吨。

在污染控制水平方面，目前我国水泥企业水泥窑窑尾烟气净化工艺主要是除尘，NO_x 还原等其他烟气净化技术和工艺基本未使用。除尘设备主要是布袋除尘器或静电除尘器，布袋除尘器还未完全普及应用，仍有不少水泥生产线采用静电除尘器。是否使用布袋除尘器与企业生产规模和企业类型无关，例如，某些小型民营企业和小型新型干法窑以及技术水平落后的立窑窑尾烟气采用了布袋除尘器，而某些技术水平先进的大型企业和大型新型干法窑还在使用静电除尘器。水泥企业水泥窑窑尾烟气中的 NO_x、SO₂、CO、O₂ 和粉尘含量在线监测设备未普及应用，部分新型干法窑只具备 O₂ 和 CO 的在线监测能力，甚至未安装在线监测系统，而绝大多数立窑无任何在线监测设备，无远程控制设备，所有监测和操

作都必须在现场进行，自动化操作和污染监控水平低。

在企业管理水平方面，目前我国多数熟料单线产能大于 2000 吨/天的新型干法生产企业都有比较完善和严格的人员培训制度、应急预案和程序，并装备了红外摄像头和火灾探测器和自动控制系统，而单线生产能力小于 2000 吨/天的小型企业在人员培训、应急设施和程序方面还不够重视，很多小型企业没有制订相关的应急预案，无任何应急设施，安全防护制度也不完善或是有制订但根本未严格执行。多数水泥企业对产品质量管理较为重视，一般均通过了 ISO9001 质量认证，但在环境管理方面相对薄弱，仅部分通过了 ISO14001 环境管理认证。

在实验室水平方面，新型干法生产企业的实验室一般都具备原料成分分析（Si、Al、Fe、Ca、Mg、K、Na、Cl、S 含量，灰份、挥发分、水分）、熟料和水泥产品质量检测的能力，成分分析一般采用较为先进的 X 射线荧光分析仪；立窑生产企业实验室水平较弱，原料成分分析大多还采用化学分析法，熟料和水泥产品质量分析方法和仪器也比较落后，分析检测项目不全。

2.2 我国水泥窑协同处置技术发展现状

2.1 水泥工业利用常规工业废渣现状

目前我国水泥企业协同处置废物种类主要限于常规的工业废渣，如电厂粉煤灰、烟气脱硫石膏、磷石膏、煤矸石、钢渣、高炉矿渣、硫酸渣等。这些工业废渣的化学成份与传统水泥生产原料近似，品质相对均匀、稳定，通常作为替代原料加入生料或作为混合材加入熟料中，协同处置易于操作，因此已被水泥企业广泛采用以节约原料成本。从废物利用的角度看，上述几种工业废渣的“资源”属性甚至高于其“废物”属性，再加上中国目前没有相关的法律法规对上述工业废渣进行规范管理，因此这些工业废物并未纳入政府管理体系而是进入了自由市场体系。正是因为如此，对上述废物进行协同处置的水泥企业不但没有向废物产生单位收取废物处置费，反而需要出钱购买。但由于废物购买费用仍低于天然原料，因此各水泥企业仍有很大积极性对上述工业废物进行协同处置。2011 年我国水泥工业已综合利用了常规工业废渣约 6.9 亿吨，水泥工业已成为我国常规工业废渣综合利用的主要途径。

2.2 水泥窑协同处置危险废物和城市废物现状

危险废物、城市废物（生活垃圾、生活污水等）、污染土壤以及含有机物的
一般工业固体废物的水泥窑协同处置在我国属于起步阶段，目前我国数千家水泥
企业中仅个别企业开展了连续性和具有一定规模的危险废物和城市废物协同处
置业务，还有一些水泥企业开展了间断性的、小规模或单一性的危险废物或城
市废物的协同处置业务，或诸如垃圾焚烧飞灰、废弃农药、废白土、重金属废物
等危险废物的协同处置试验工作。除此以外，我国水泥企业在应急处置各种事
故产生废物方面发挥了一定作用，例如在各种专项整治活动中收缴的违禁化学
品（如毒鼠强等剧毒农药，POPs 废物）、不合格产品（如含三聚氰胺奶粉、伪
劣日化产品等）以及事故污染土壤等废物的处置，但是这些工作还未形成这一
技术应有的规模，在我国危险废物管理中还不能发挥其应有的作用。

我国的水泥企业很少利用可燃废物作为替代燃料，水泥工业的燃料替代率
几乎为零，远低于欧美发达国家的平均水平。即使对于已成功开展连续性和
大规模危险废物协同处置业务的水泥企业，也很少协同处置具有替代燃料价
值的废物，燃料替代率也很低。这主要是由两个方面的原因造成的：首先是
水泥企业缺少使用替代燃料的技术能力；其次是我国的废物管理体系还不够
健全，致使水泥企业很难收集到可燃性废物。

（1）危险废物的水泥窑协同处置

金隅集团下属的北京金隅红树林环保技术有限公司是目前我国开展危险废
物水泥窑协同处置业务最为成功的水泥企业，2005 年建成了用于协同处置工
业废物的水泥生产线，工业废物处置能力为 8—10 万吨/年，目前已取得了
环保部颁发的 30 种危险废物的处置经营许可证，2011 年处置危险废物 6
万吨。另外，北京金隅红树林环保技术有限公司还是北京 20 万吨 DDT 和六
六六污染土壤的处置单位。2009 年金隅集团下属的河北金隅红树林环保技
术有限公司也建成了协同处置工业废物的水泥生产线，2010 年 10 月取得
了河北省环保厅颁发的 19 种危险废物的处置经营许可证，2011 年处置危
险废物约 3000 吨。

华新水泥（武穴）有限公司是目前我国另一家较为成功开展危险废物协
同处置业务的水泥企业，2007 年建成了协同处置工业废物的水泥生产线，
目前已取得了湖北省颁发的 15 类危险废物的处置经营许可证，2011 年
处置危险废物 2762.79 吨。

上海万安企业总公司（原上海金山水泥厂）也是我国目前少有的几家已取得危险废物处置经验许可证的水泥企业之一，该公司在 1996 年就取得了上海市环保局颁发的 9 种危险废物的处置经验许可证，但由于缺少配套的废物管理能力，危险废物协同处置业务不能保证连续运营，没有形成实际的危险废物处置能力。

另外，宁波科环新型建材有限公司（原宁波舜江水泥有限公司）2004 年开展了电镀污泥的水泥窑协同处置业务，年处置电镀污泥 2-3 万吨。2011 年，烟台山水水泥有限公司、太原狮头集团废物处置有限公司、太原广厦水泥有限公司、陕西秦能资源科技开发有限公司、柳州市金太阳工业废物处置有限公司等 5 家企业获得了危险废物经营许可证开展了水泥窑协同处置危险废物的业务。

除此以外，目前我国基本上没有其他水泥企业取得危险废物经营许可证开展连续的、规模化的危险废物协同处置业务。

（2）城市生活污水污泥的水泥窑协同处置

利用水泥窑协同处置生活污水污泥主要技术路线包括两种：第一种是将经机械脱水后的湿污泥（含水率 80%）直接投入水泥窑高温区；第二种是利用水泥窑高温烟气对机械脱水后的湿污泥（含水率 80%）进行干化（含水率降至 10%-35%）后再投入水泥窑高温区。前者投资成本低，但污泥处置能力小，后者投资成本高，但处置能力大。利用水泥窑高温烟气对生活污泥进行干化又包括两种方式，一种是以导热油为介质的非接触式间接干化，另一种是接触式直接干化。

目前我国已有 5 家水泥企业开展了水泥窑协同处置生活污水污泥的业务：北京金隅红树林环保技术有限公司于 2006 年开始采用直接投加的方式协同处置污泥，污泥处置能力 100 吨/天（含水率 80%，下同）；采用直接投加方式协同处置污泥的水泥企业还包括重庆拉法基瑞安（南山）水泥有限公司（2008 年建成，污泥处理能力 100 吨/天），华新（宜昌）水泥有限公司（2009 年建成，污泥处理能力 150 吨/天），天山水泥集团溧阳分公司（2010 年建成，污泥处理能力 120 吨/天）；2009 年北京金隅红树林环保技术有限公司建成运行了污泥水泥窑余热干化示范线，采用非接触式间接干化技术，污泥处置能力 500 吨/天；2009 年广州越堡水泥有限公司也建成运行了污泥水泥窑余热干化示范线，采用接触式直接干化技术，污泥处理能力 600 吨/天。除此以外，随着生活污水产生量的不断增加，越

来越多的水泥企业对协同处置生活污水泥表现出了兴趣，一些新的生活污水泥水泥窑协同处置设施即将或正在建设中。

（3）城市生活垃圾的水泥窑协同处置

利用水泥窑协同处置生活垃圾主要包括三种技术路线：第一种是 RDF（垃圾衍生燃料）入窑工艺，即将生活垃圾经分拣、筛分选出可燃成分再经破碎等工艺制成 RDF 后投入水泥窑高温区进行焚烧处置；第二种是预焚烧（气化）入窑工艺，即将生活垃圾首先在水泥窑旁专门新建的预焚烧（气化）炉进行干化、预烧（气化）后再投入水泥窑进行焚烧处置；第三种是发酵入窑工艺，即将生活垃圾首先在好氧发酵装置内进行脱水和均化处理后再投入水泥窑进行焚烧处置。

目前我国已有 3 家水泥企业建成运行了水泥窑协同处置生活垃圾的示范线：安徽铜陵海螺水泥有限公司于 2009 年建成投产的水泥窑协同处置生活垃圾示范线采用了预焚烧入窑工艺，生活垃圾处置能力 600 吨/天；华新水泥（秭归）有限公司于 2010 年 6 月建成投产的水泥窑协同处置生活垃圾低品质包装废物示范线采用了 RDF 入窑工艺，生活垃圾低品质包装 RDF 处置能力 140 吨/天；华新水泥（武穴）有限公司于 2011 年 4 月建成运行的水泥窑协同处置生活垃圾示范线采用了发酵入窑工艺，生活垃圾处置能力 500 吨/天。

除此以外，广旺集团天台水泥有限公司于 2007 年开展了水泥窑协同处置生活垃圾的示范试验，采用的是预焚烧入窑工艺，试验的 24 小时内处置了 60 吨生活垃圾。河南的洛阳黄河同力水泥有限责任公司、天瑞集团郑州水泥有限公司，贵州的贵定海螺盘江水泥有限公司、遵义三岔拉法基瑞安水泥有限公司，江苏的天山水泥集团溧阳分公司，北京的琉璃河水泥有限公司等水泥企业目前正在建设水泥窑协同处置生活垃圾设施。

（4）污染土壤的水泥窑协同处置

利用水泥窑协同处置的污染土壤主要是被有机物污染的土壤。2007 年，北京金隅红树林环保技术有限公司在我国率先开展了水泥窑协同处置污染土壤的业务，其污染土壤主要为被 DDT 和六六六农药污染的土壤，总计 20 万吨；2010 年重庆拉法基瑞安地维特种水泥有限公司开展了水泥窑协同处置 POPs 污染土壤的业务，计划处置污染土壤 3 万吨。除此以外，河北金隅红树林环保技术有限公

司和化新水泥（武穴）有限公司等水泥企业也计划在近期开展 POPs 污染土壤的水泥窑协同处置业务。

利用新型干法窑对危险废物、城市废物、污染土壤以及含有机物的一般工业固体废物进行协同处置，原则上无需对原有工艺进行大的技术改造，一般只需要根据实际情况对投料口改造和添置必要的预处理设施。尽管目前我国的新型干法生产线还存在着单线平均规模较小、污染控制水平发展不均衡的弱点，但已具备了危险废物和城市废物协同处置的基本技术平台。危险废物、城市废物、污染土壤以及含有机物的一般工业固体废物的水泥窑协同处置包括废物评估、废物运输、废物入厂、废物分析、废物贮存、废物预处理、废物投加等过程，这除了需要依托代表先进水平的新型干法生产线基础平台外，还需要必要的预处理设施、投料装置、符合要求的贮存设施和实验室分析能力，而这些正是目前我国水泥企业技术力量还较为薄弱的环节。但预处理设施、投料装置、贮存设施、实验室分析能力的技术壁垒和准入条件都相对较低，只要企业愿意承担必要的前期资金投入，预处理、投料、贮存设施和实验室是可以达到符合要求的技术水平的。

开展危险废物、城市废物、污染土壤以及含有机物的一般工业固体废物的水泥窑协同处置需要有比常规水泥生产更高的环境管理水平，必须有完善成体系的废物管理制度和专职管理部门，对废物的评估、运输、入厂、分析、贮存、预处理、投料等环节进行严格有效的控制；为了防止意外事故发生和减少事故后损失，必须有符合要求的应急设施和完善的应急预案；同时，为了使水泥专业操作人员具有必要环境专业知识和危险废物操作专业技能，必须有严格的人员培训和上岗制度。而目前我国水泥企业在这方面的力量还较为薄弱，因此水泥企业若想开展协同处置业务，必须加大针对上述几个方面投入，提高自身协同处置管理水平。

2.3 其他国家和地区水泥窑协同处置技术发展现状

水泥窑协同处置废物技术在发达国家已有 30 多年的应用经验，对这些国家的废物处置发挥了巨大作用，其环境效益、经济效益和社会效益已得到充分证实。

(1) 美国

美国是次于中国和印度的世界第三大水泥生产国，美国水泥生产集中度较

高，2007年美国有35家水泥公司，118个水泥厂，水泥窑约185座，其中新型干法窑150座，湿法窑35座，还有近20个粉磨站，熟料产能9350万吨，水泥总产能1.15亿吨，其中新型干法窑单线熟料产能为56万吨/年，湿法窑单线熟料产能26万吨/年。但美国的水泥生产能力长期小于市场需求，缺口一般在25%左右，2007年进口水泥2270万吨。美国的众多水泥公司中有15家分属于国际最大的几家跨国公司所有，占熟料总产能的90%，其中由Holcim、Lafarge、Cemex、Heidelberg、Italcementi这5家大公司占总产量的54%。，剩下的10%则分属于美国另外20家当地的水泥公司。

美国的水泥工业从1974年就开始利用有机废物，上世纪80年代中期以来，随着美国联邦法规对危险废物处理要求的加强，危险废物焚烧处理量迅速增加，到了1987年这种做法已经相当普遍。美国环保署有一项政策：每个工业城市至少保留一个水泥厂，在部分满足水泥需求的同时还用于处理城市产生的危险废物。美国的水泥厂仅在1989年共焚烧了工业危险废物100多万吨，是当年焚烧炉处理危险废物的4倍，1990年，美国111家水泥厂中有34家使用工业危险废物作为替代燃料，1994年美国共有37家水泥厂得到利用危险废物作为替代燃料烧制水泥的许可证，处理了全美国近60%的危险废物，1989年至2000年美国利用水泥窑处置的危险废物总量稳定在100万吨/年左右。2009年，美国总计163个水泥窑中有24个用于协同处置危险废物，协同处置危险废物的窑型包括湿法长窑、干法长窑、带预热器的干法窑、新型干法窑、以及半干法窑（立波尔窑），其中大部分为湿法长窑。危险废物在水泥窑内的试烧结果显示，即使难降解的有机废物（包括POPs废物）在水泥窑内的焚毁去除率率也可达到99.99%到99.9999%。

（2）日本

日本是第四大水泥生产国，2007年有水泥生产企业18个，共32个工厂，57座窑，生产能力7020万吨，产量7320万吨。日本水泥协会的统计表明日本水泥业使用替代燃料的数量逐年增多，其中城镇生活污水处理厂污泥的使用量从2002年的230万吨，增长到2006年的300万吨，是增长数量最多的替代燃料之一。

由于日本资源匮乏，而水泥生产技术先进，日本水泥企业在废物利用和处理

方面处于世界前列。根据日本麻省水泥株式会社的一份资料显示，日本在水泥窑上处置工业危险废物具有面广、量多的特点，目前已能处置生活污水和多种危险废物。

上个世纪 80 年代末 90 年代初，当人们还没有普遍认识到水泥回转窑处置可燃废物和垃圾的经济性和安全性优于焚烧炉之前，日本已经在全国各地新建了 2000 多座专用的废物和垃圾焚烧炉。这些垃圾焚烧炉都采用了先进技术装备，环保标准很高，而且具有足够的力量处置全国的可燃废物。因此，现今日本水泥工业的燃料替代率低于欧洲，而如何利用焚烧炉灰渣制造水泥成了日本水泥行业利废的一个主要研究项目。2001 年 4 月，日本建成了以焚烧炉灰渣为主要原料的年产“生态水泥”11 万吨的生产线，2002 年 7 月制订了“生态水泥”的工业标准，为焚烧炉灰渣的有效利用创出了一条途径。2006 年日本水泥企业的替代原料使用总量达到了 2889 万吨，平均每吨水泥使用替代原料 395kg。

(3) 欧洲

欧洲水泥行业是使用替代燃料数量最多的工业行业。根据 2007 年《废物焚烧指令》执行评估报告，以废物作为替代燃料并获得欧盟许可证的企业中，水泥企业有 124 家，欧洲各国协同处置危险废物的水泥窑窑型大多是新型干法水泥窑。根据欧盟的统计，欧洲 18% 的可燃废物被工业行业利用，其中有一半是水泥行业，是电力、钢铁、制砖、玻璃等行业的总和。据统计，目前欧洲有大约 250 多个水泥厂开展了危险废物作为替代燃料的业务，2000 年协同处置了约 100 万吨的危险废物，2006 年欧洲水泥企业的燃料替代率达到了 18%，每年可减少 CO₂ 排放 900 万吨，减少煤炭消耗 500 万吨，原料替代率为 5%，即每年节省常规天然原料 1450 万吨，若算上加入水泥中的替代混合材，则原料替代率可达 30% 以上。目前欧美发达国家通过改进熟料生产工艺可实现的能耗降低潜力不足 2%，进一步降低能耗，只有通过增加替代燃料使用的方式来实现。

随着水泥窑协同处置废物理论和实践的发展和各国相关法规的健全，这种技术在环保和经济两个方面显示出优势，在发达国家形成不同程度的产业规模，在危险废物的处置中发挥重要作用。一些欧洲国家开展水泥窑协同处置废物的情况详述如下：

① 德国

德国是世界上较早利用水泥窑协同处置废物的国家，自 1980 年以来，德国水泥工业的燃料替代率保持了迅猛的增长势头，德国汉堡等公司进行了一系列水泥窑协同处置废物试验，取得了一定的成功，并开始用于工业生产。1999 年有 18 个水泥厂以废轮胎做为替代燃料，50% 的水泥厂不同程度的利用各种可燃废物，2001 年燃料替代率达到了 30%，2005 年有 80% 以上的水泥厂开展了废物协同处置业务。

2001 年德国水泥工业替代原料的使用量达到了 668.4 万吨，占全国废物利用总量的 17.1%。德国水泥工业综合利用的最大特色在于各种用途的发展较均衡，可利用的废物种类多，范围广，环保要求高。

②法国

法国 Lafarge 水泥公司从 1970 年开始了废物代替自然资源的研究工作，经过近 30 年的研究和发展，危险废物处置量稳步增长。2004 年，该公司在法国协同处置的危险废物占全国焚烧处置的危险废物总量的 50%，燃料替代率达到 50% 左右。上世纪九十年代以来 Lafarge 水泥公司在法国协同处置的危险废物种类和数量如图 1 所示。

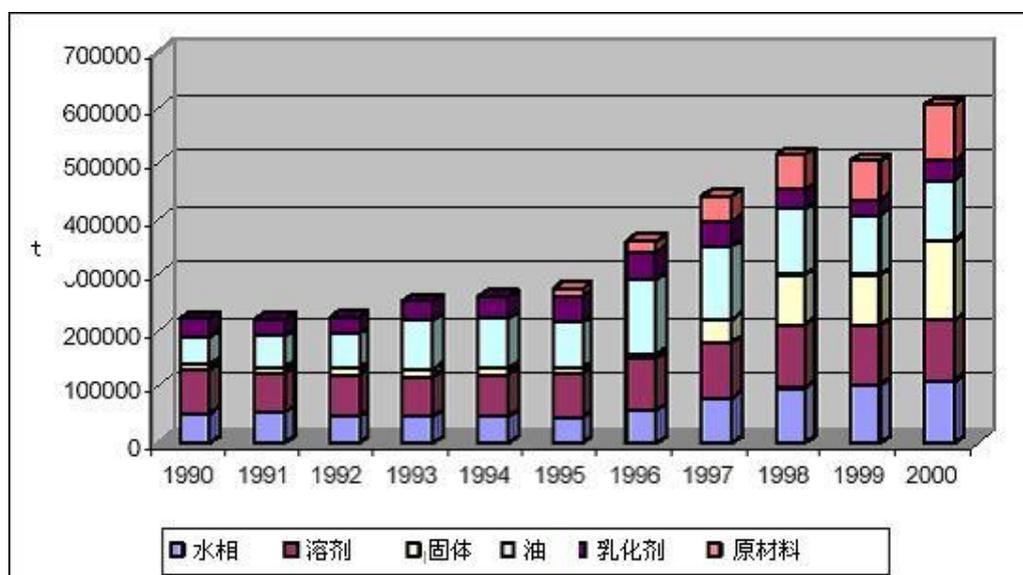


图 1 Lafarge 水泥公司在法国协同处置的危险废物种类和数量

③瑞士

瑞士 Holcim 水泥公司在上世纪 80 年代开始开展可燃性废物作为替代燃料的工作。Holcim 水泥公司在比利时有一家湿法水泥厂，该厂以危险废物作为替代

燃料的燃料替代率已经达到了 80%，其余约 20%的燃料为回收的石油焦，目前该厂的燃料成本已降为 2%左右。这些可燃性工业废物、废油、液态燃料和经过干燥粉磨的精炼厂油渣从窑头喷射入窑内燃烧，家庭和工厂自身产生的废物（废纸、废塑料、废衣物和织物）用塑料膜打包后，经窑中喂料装置从窑中喂入。

④欧洲其它国家

瑞典水泥工业的燃料替代率已达 20%以上，2008 年达到 50%以上，计划 2020 年基本实现 100%；丹麦 Aalborg 市每年产生 30000 吨含水率 85%-90%的城市污泥，经机械脱水和低温干燥后用作水泥原料，在污泥烘干过程中产生的沼气用于城市供热。Aalborg 水泥厂采用城市污泥配料以后，熟料热耗及 CO₂、NO_x 排放均有所降低。英国开展水泥窑协同处置生活垃圾的工业试验，试验结果表明 4 吨生活垃圾可替代 1 吨煤。在挪威，利用水泥窑焚烧处置 PCBs 已开展了 10 多年。

3 标准制订的必要性分析

3.1 国家及环保主管部门的相关要求

《国务院关于落实科学发展观加强环境保护的决定》（国发〔2005〕39 号）中提出要大力发展循环经济，强化对各类废物的循环利用。国家环境保护“十一五”规划中也明确提出“控制固体废物污染，推进其资源化和无害化”。利用水泥窑协同处置危险废物不仅可以达到其无害化处置的目的，而且可以有效地利用废物作为水泥生产中的替代燃料和原料，达到废物资源化利用，符合我国“十一五”节能减排的发展方向。

3.2 国家相关产业政策及行业发展规划中的环保要求

我国“水泥工业发展专项规划”提出鼓励要重视资源综合利用,鼓励企业利用固体废弃物等替代粘土配料，支持采用工业废渣做原料和混合材。推广利用水泥窑处理工业废弃物及分类好的生活垃圾等技术，发展循环经济。我国“水泥工业产业政策”（中华人民共和国国家发展和改革委员会令第 50 号）第八条中规定了国家鼓励和支持企业发展循环经济，鼓励和支持利用在大城市或中心城市附近大型水泥厂的新型干法水泥窑处置工业废弃物、污泥和生活垃圾，把水泥工厂同时作为处理固体废物综合利用的企业。由此可见，在水泥行业 and 产业发展规划中都利用水泥窑协同处置工业废物提出了相关的鼓励政策和措施。

3.3 行业发展带来的主要环境问题

根据国家统计局最新统计，2011 年规模以上水泥企业全年水泥产量约 20.8 亿吨，约占世界水泥产量 50%以上。每年需要消耗约 22 亿吨原材料，1.9 亿吨煤，2100 亿度电能，并排放 12 亿多吨 CO₂ 和大量粉尘、NO_x 和 SO₂；与此同时，我国每年至少产生 1000 万吨危险废物，以及约 1.6 亿吨城市生活垃圾和 3000 多万吨污泥（80%含水率），但这些固体废物的处置设施容量远远满足不了需求，急需改善。

危险废物在水泥窑中焚烧的同时也会带来污染物排放增加的问题，除了水泥生产中常规的污染物排放外，还包括 VOC、HCl、重金属、二噁英等特征污染物。对于可能由协同处置危险废物所带来的大气污染物排放增加和控制问题一直是对该废物处置技术的最大关注点之一。此外，协同处置危险废物生产的水泥产品中的重金属在使用过程中也可能会对环境造成一定的污染风险。

3.4 现行相关标准存在的主要问题

目前，我国的水泥企业在环境保护方面所需遵守的主要大气污染物排放标准为《水泥工业大气污染物排放标准》（GB4915-2004），其中涉及到利用水泥窑协同处置危险废物的相关条文很少，且对于协同处置危险废物的大气污染物的排放指标不够全面，只规定了颗粒物、NO_x、SO₂ 和氟化物等四项指标，其它排放指标和限值均按照我国《危险废物焚烧污染控制标准》（GB18484-2001）。但这些污染物排放指标和排放限值均不是根据水泥窑协同处置废物的特点和现状而制定的。因此，为了适应我国水泥窑协同处置危险废物的发展要求，需要制定水泥窑协同处置危险废物大气污染物的排放和污染控制标准。

按照现行《水泥工业大气污染物排放标准》中规定“水泥窑不得用于焚烧重金属类危险废物”，这一规定不能满足目前水泥窑协同处置危险废物的需求。首先，重金属类危险废物含义较为模糊，无法界定；其次，大量研究表明，固体废物中重金属在水泥窑协同处置过程中能进入水泥熟料的晶格，起到很好的固定作用。只要按照水泥窑协同处置危险废物技术规范的要求，合理地控制重金属废物的投加速率，重金属对水泥产品质量的影响和对烟气污染物排放的问题就能得到很好的控制。因此，本标准的制定过程需要对水泥窑烟气排放标准中的重金属指标进行重新研究和规定。

此外，我国《水泥工业大气污染物排放标准》对于协同处置危险废物的水泥

窑设施和窑型，以及运行技术要求都没有具体规定，而这些方面对于利用水泥窑协同处置危险废物的污染控制是关键因素。

我国利用水泥窑协同处置危险废物的需求越来越大，正成为一种废物资源化利用和水泥企业降低生产成本的一种方式。我国还没有针对水泥窑协同处置危险废物的污染控制标准，阻碍了该行业的发展，因此有必要制定水泥窑协同处置危险废物的污染控制标准。

4 编制依据

- 中华人民共和国环境保护法
- 中华人民共和国固体废物污染环境防治法
- 中华人民共和国大气污染防治法
- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB 4915 水泥工业大气污染物排放标准
- GB 12573 水泥取样方法
- GB 18597 危险废物贮存污染控制标准
- GB □□□□ 固体废物生产水泥污染控制标准
- GB/T 16157 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法
- HJ 77.2 环境空气和废气 二噁英类的测定 同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法
- HJ 538 固定污染源废气 铅的测定 火焰原子吸收分光光度法 (暂行)
- HJ 540 环境空气和废气 砷的测定 二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法(暂行)
- HJ 543 固定污染源废气 汞的测定 冷原子吸收分光光度法 (暂行)
- HJ/T 29 固定污染源排气中铬酸雾的测定 二苯基碳酰二肼分光光度法
- HJ/T 63.1 大气固定污染源 镍的测定 火焰原子吸收分光光度法
- HJ/T 63.2 大气固定污染源 镍的测定 石墨炉原子吸收分光光度法
- HJ/T 63.3 大气固定污染源 镍的测定 丁二酮肟-正丁醇萃取分光光度法
- HJ/T 64.1 大气固定污染源 镉的测定 火焰原子吸收分光光度法
- HJ/T 64.2 大气固定污染源 镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法
- HJ/T 64.3 大气固定污染源 镉的测定 对一偶氮苯重氮氨基偶氮苯磺酸

分光光度法

- HJ/T 65 大气固定污染源 锡的测定 石墨炉原子吸收分光光度法
- HJ/T 67 大气固定污染源 氟化物的测定 离子选择电极法
- HJ/T 76 固定污染源排放烟气连续监测系统技术要求及检测方法
- HJ/T 176 危险废物集中焚烧处置工程建设技术规范
- HJ/T 365 危险废物(含医疗废物)焚烧处置设施二噁英排放监测技术规范
- HJ/T 397 固定源废气监测技术规范

《污染源自动监控管理办法》(2005 年国家环境保护总局令第 28 号)

5 编制原则

本标准的编制遵循以下原则:

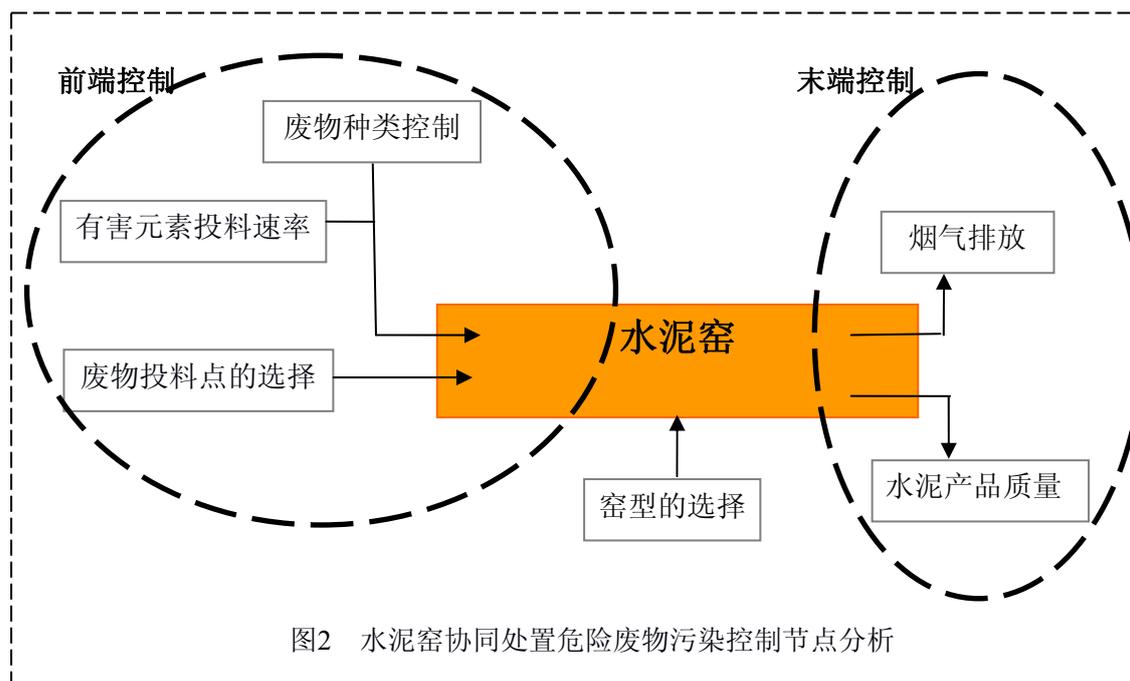
(1) 以科学发展观为指导, 以实现经济、社会的可持续发展为目标, 以国家环境保护相关法律、法规、规章、政策和规划为根据, 通过制定和实施标准, 促进环境效益、经济效益和社会效益的统一。

(2) 协同处置全过程污染控制原则。针对水泥窑协同处置危险废物的污染节点进行分析, 分别提出对应的控制措施。通过废物种类控制、废物中有害元素的投料控制、投料点的选择、烟气污染物排放控制, 以及水泥产品质量控制等进行全过程污染控制。

(3) 技术可行性原则。根据国内外水泥窑大气污染物的最佳控制技术, 结合我国实际情况经济、技术发展水平, 并参照采用国外相关标准和技术法规的相关规定, 制定切实可行的大气污染物排放限值。对每一受控的污染物项目, 从污染排放源特征, 结合现实技术能达到的控制水平, 得出技术可行的标准限值。

6 水泥窑协同处置污染节点分析与控制方法

遵循水泥窑协同处置危险废物全过程污染控制原则, 水泥窑协同处置危险废物的污染节点主要包括前端控制和末端控制, 如图 2 所示。其中, 前端控制主要包括通过废物种类控制、废物中有害元素的投料控制、投料点的选择; 后端控制主要包括烟气污染物排放控制和水泥产品质量控制和环境安全性控制等。



6.1 前端控制节点与控制方法

主要包括通过废物种类控制、废物中有害元素的投料速率控制、投料点的选择。

6.1.1 废物种类控制

与专业危险废物焚烧炉相比较而言，水泥窑的工艺特点决定了它没有完整的烟气处理系统，且需要顾及到产品的质量和环境保护安全。因此，并非所有种类的废物都能入窑处置。控制水泥窑协同处置的废物种类和入窑废物的特性是十分必要的。其中，某些危险废物是禁止在水泥窑中处置的。例如放射性废物；爆炸物及反应性废物；未经拆解的废电池、废家用电器和电子产品；含汞的温度计、血压计、荧光灯管和开关；未知特性和未经鉴定的废物。除此之外，其他废物在进入水泥窑进行协同处置之前应进行适当的预处理，防止对窑况和水泥产品质量的不良影响。

6.1.2 废物中有害元素的投加速率的控制

控制入窑废物中的有害元素（重金属、氯、氟、硫等）的投加速率是水泥窑协同处置废物污染控制的重要手段。通过适当的预处理方法，将危险废物中的有害元素的投加速率控制在合理的范围之内，以免发生烟气排放超标，结皮阻塞的不良现象。

6.1.3 投料点的选择

根据水泥窑的工艺特点, 适合进行危险废物协同处置的投料点主要有以下三处选择: (1) 窑头高温段: 包括主燃烧器投加点和窑门罩投加; (2) 窑尾高温段: 包括预分解炉、窑尾烟室和上升管道投加; (3) 生料配料系统 (生料磨)。

应根据危险废物特性和水泥窑中各投加位置的温度和停留时间等参数合理选择投料点。例如含高氯、高毒、难降解有机物质的危险废物适宜从窑头的主燃烧器进行处置。

6.2 末端控制节点与控制方法

6.2.1 末端尾气排放控制

(1) 重金属

控制节点: 废物中重金属和氯的投加速率的控制。废物中重金属的投加速率直接影响烟气中重金属浓度, 而废物中氯的投加速率影响重金属的挥发特性。

控制方法: 假设废物中重金属全部挥发进入烟气, 根据烟气排放浓度限值, 以及生产 1kg 熟料产生 2.3Nm³ 烟气, 可计算出生产 1kg 熟料的重金属投加量的限值, 再根据每小时的熟料产量可计算重金属的投加速率限值。或企业通过试烧, 确定满足烟气排放标准时重金属的最大投加速率。

(2) 二噁英

控制节点: 尾气急冷温度和含氯量的投料速率控制, 200-450℃ 是二噁英合成温度区间。

控制方法: 优化预热器内热交换方式, 采用尾气急冷减少烟气从 450℃ 降到 200℃ 的停留时间, 减少氯含量, 采用布袋除尘器提高附着二噁英的粉尘的捕获。

(3) TOC 和 DRE

控制节点: 投料点的选择和窑型的选择。不同的投料点和不同的窑型具有不同的温度分布和停留时间, 使废物中的有机物在窑内具有不同的分解率。

控制方法: 含 POPs 和高氯、高毒、难降解、难挥发有机废物优先选择从窑头投入; 若受物理特性限制不便从窑头投入, 可从窑尾高温区段投入; 上述废物禁止从配料系统投入窑系统。含有易挥发性有机物的替代原料禁止从配料系统投

入窑系统。

(4) HF 和 HCl

回转窑内的碱性环境可以中和绝大部分 HF、HCl，废物中的 Cl、F 含量主要对系统结皮和水泥产品质量有影响，而与烟气中 HF 和 HCl 的排放无直接关系。

(5) SO₂

原料带入的易挥发性硫化物是造成 SO₂ 排放的主要根源，从高温区投入水泥窑的废物中的 S 元素主要对系统结皮和水泥产品质量有影响，而与烟气中 SO₂ 的排放无直接关系。

(6) NO_x 和粉尘

NO_x 和粉尘的排放浓度基本与水泥窑的废物协同处置过程无关。

6.2.2 水泥产品环境安全性控制

控制节点 1：投料点选择和窑型的选择。不同的窑型和不同的投料点具有不同的温度分布和停留时间，使重金属在熟料中的固化形式不同，而固化形式直接影响重金属浸出特性。

控制方法：含重金属废物应选择新型干法窑进行协同处置。重金属含量较高的废物优先选择从窑尾高温段投入窑系统。若从窑头投入，应喷入到固相反应带，并通过试验证明水泥产品的重金属浸出未受影响。

控制节点 2：废物中重金属和 Cl 的投加速率

废物中重金属和 Cl 的投加速率直接影响熟料和水泥中重金属浓度，而水泥中重金属浓度与重金属浸出特性有一定关系。

控制方法：通过废物预处理，控制废物中重金属和氯的投加速率。可以假设全部进入熟料，并在某种场景下确定浸出率，根据现有水中重金属浓度标准计算重金属投加速率。

6.2.3 其它控制节点

过程事故风险控制节点：危险废物运输、储存、预处理、投料过程防止危险废物泄漏，防止发生化学反应、火灾等事故。

控制方法：采用废物准入和评估程序，对废物进行反应性和兼容性分析以了解和控制废物爆炸和反应风险。废物预处理设施和投料设施应具有较高的自动化操作功能和较好的密封性。严格执行我国危险废物相关的管理规范 and 标准，最大限度地降低危险废物泄漏风险。

7 标准内容结构

本标准主要包括以下内容：

- (1) 适用范围
- (2) 规范性引用文件
- (3) 术语与定义
- (4) 协同处置设施
- (5) 入窑协同处置危险废物特性
- (6) 运行技术要求
- (7) 大气污染物排放限值
- (8) 监测要求
- (9) 实施与监督
- (10) 附录

8 主要条文说明

8.1 适用范围

本节指明了本标准的适用范围，即规定了本标准适用于利用水泥窑协同处置危险废物过程中的污染控制和监督管理，包括协同处置危险废物水泥窑的设施技术要求、入窑废物特性要求、运行操作要求、污染物排放限值、监测和和监督管理等要求。

目前我国水泥企业协同处置废物种类主要限于常规的工业废渣，如电厂粉煤灰、烟气脱硫石膏、磷石膏、煤矸石、钢渣、高炉矿渣等。这些工业废渣的化学成份与传统水泥生产原料近似，品质相对均匀、稳定，通常作为替代原料加入生料或作为混合材加入熟料中，协同处置易于操作，环境和安全风险小，已被水泥企业广泛采用以节约原料成本，因此本标准不对该类废物的协同处置做强制性要求。

除危险废物和和常规工业废渣的其他废物，如生活垃圾（包括废塑料、废橡胶、废纸、废轮胎等）、城市污水处理厂污泥、受污染土壤以及含有机物的一般工业固体废物在水泥窑中协同处置过程的污染控制可参照本标准的相关规定执行。

8.2 规范性引用文件

本部分列出了在本标准中所引用的国家标准、技术规范。这些标准和文件的有关条文通过引用成为本标准的组成部分。

8.3 术语与定义

本部分为执行本标准制定的专门的术语和对容易引起歧义的名词进行了定义。

标准状态指温度为 273K，压力为 $1.01 \times 10^5 \text{Pa}$ 时的状态。本规范规定的大气污染物排放浓度均指标准状态下 O_2 含量 10% 的干烟气中的数值，与我国水泥行业标准 GB 4915 一致。

最高允许排放浓度指处理设施后排气筒中污染物在规定时间段内的浓度平均值不得超过的限值。所谓规定时间段，对于在线连续监测项目（如颗粒物、 SO_2 、 NO_x 、HCl），指 24 小时；对于非在线连续监测项目（如 TOC、重金属、二噁英/呋喃、氟化物等），指标准采样方法中规定的采样时间。

新型干法水泥窑指在窑尾配置了悬浮预热器和分解炉的回转式水泥窑，代表了当代水泥工业生产水泥的最新技术，也是目前最常见的水泥生产线类型。

水泥窑协同处置指将废物投入水泥窑，在进行水泥生产的基础上，同时实现对废物的无害化处置的过程。如果废物具有热值或含有 Si、Al、Fe、Ca 等水泥生产所需要的成分，协同处置在实现废物无害化处置的同时，还实现了能量和物质的回收利用；若废物无可利用的能量和物质，则协同处置本质上为废物的无害化处置。本标准中的协同处置不包括将废物替代部分混合材掺入熟料的过程。

危险废物的定义引自我国《危险废物鉴别标准》（GB 5085），二噁英类和二噁英毒性当量的定义均引自我国《危险废物焚烧污染控制标准》（GB 18484）。

DRE 和有机标识物的定义参考美国水泥窑共焚烧危险废物大气污染物排放

标准，即最大可实现控制技术（MACT）标准。

重点地区定义参照《水泥工业大气污染物排放标准》。

8.4 协同处置设施

本标准第 4 节规定了协同处置水泥企业在硬件配置方面的基本技术要求。

本节 4.1 条规定了适合协同处置危险废物的水泥窑设施技术要求。

(1) 单线设计熟料生产规模不小于 2000 吨/天的新型干法水泥窑

水泥窑按生料制备方法可分为湿法、半湿法、干法、半干法四类；按煅烧窑结构可分为立窑和回转窑两类，其中回转窑又可分为湿法回转窑、半干法回转窑（立波尔窑）、干法回转窑（普通干法回转窑）、新型干法回转窑等多种类型。水泥窑类型如表 1 所示。

表 1 水泥窑类型

生料制备方法	煅烧窑结构分类	
湿法	回转窑	湿法长窑
半湿法	回转窑	湿法短窑（带料浆蒸发机的回转窑）
		湿磨干烧窑
半干法	回转窑	立波尔窑
	立窑	普通立窑
		机械立窑
干法	回转窑	干法中空长窑
		悬浮预热窑
		新型干法窑（预分解窑）

从水泥生产的角度看，新型干法窑与其他窑型相比具有巨大优势，具有热耗低，生产效率高，单机生产能力大，生产规模大；窑内热负荷小，窑衬寿命长，窑运转率高等优点，代表了当代水泥工业生产水泥的最新技术，是水泥产业结构调整的方向；其他窑型均属于淘汰窑型，除立窑因数目众多仍需逐渐淘汰外，其他窑型在我国均很少运行。

从废物协同处置的角度看，相比立窑，回转窑具有明显优势。对于回转窑来说，无论什么窑型，熟料煅烧都需要经过干燥、黏土矿物脱水、碳酸盐分解、固相反应、熟料烧结及熟料冷却结晶等几个阶段，各阶段的气固相温度也基本相同。回转窑内固有的气固相温度和停留时间都足以实现废物的无害化处置。而立窑无论是窑内气固相温度分布、气固相停留时间、气氛以及火焰特点都与回转窑有较

大差异，废物中的有机物和重金属极易随烟气排入大气，适合协同处置废物种类一般仅限于以替代原料为目的的常规工业固体废物和铬渣。新型干法回转窑相比其他回转窑具有废物投料点多，分解炉内分解反应对温度的要求较低，废物适应性强；气固混合充分，碱性物料充分吸收废气中有害成分，“洗气”效率高，废气处理性能好；NO_x 生成量少，环境污染小等优点。因此，综合考虑水泥生产和废物协同处置，新型干法回转窑是适合废物协同处置的最佳窑型。

根据我国 2006 年 10 月发布实施《水泥工业产业发展政策》和《水泥工业发展专项规划》等水泥产业政策，可以看出熟料产量大于 2000 吨/天的新型干法生产线将成为我国水泥生产线的主流，熟料产量大于 4000 吨/天的新型干法生产线则是未来的发展方向。目前 2000 吨/天规模以上的新型干法窑在各省都有分布，可以满足危险废物区域集中处置的要求。此外，2000 吨/天规模以上的新型干法生产线具有较好的污染控制设施配备和管理措施。因此，考虑到产业政策和未来发展趋势的需要，以及对协同处置基本技术水平的要求，协同处置危险废物应选择熟料生产量达到 2000 吨/天及以上规模的新型干法回转窑。

(2) 采用窑磨一体机模式。生料磨内的低温碱性生料有利于冷凝和吸附烟气中的重金属、二噁英、酸性气体等有害成分，大大降低排放烟气中污染物的浓度。因此，协同处置危险废物的水泥窑应采用窑磨一体机模式。

(3) 采用高效布袋除尘器作为烟气除尘设施。危险废物协同处置的原则之一是控制危险废物协同处置过程的污染物排放。高效布袋除尘器能大大降低烟气中粉尘的排放浓度，对于有效控制水泥窑在协同处置危险废物中的污染物作用非常显著，也是目前水泥行业除尘设施发展的趋势。

(4) 经试烧证明新型干法水泥窑设施对有机标识物的焚毁去除率不小于 99.9999%，焚毁去除率的测试方法参照本标准中附录三。为检验水泥窑对有机物的分解破坏能力，协同处置企业在开展协同处置危险废物之前，应开展危险废物试烧测试和性能验证。若试烧测试时对有机标识物的焚毁去除率不小于 99.9999%，则可认为该水泥窑对有机物的分解破坏能力满足要求。

(5) 对于改造利用原有设施用于协同处置危险废物的水泥窑，为了确保改造后的水泥窑在协同处置危险废物过程中的污染物排放可以满足本标准规定，该水泥窑设施在改造前应具有良好的窑况，因此要求原有设施在改造前至少连续两

年满足水泥窑常规生产时的大气污染排放标准（即 GB4915）。

本节第 4.2 条规定了危险废物协同处置设施地理位置的基本要求。选择和确定协同处置危险废物的水泥生产设施位置时，首先应符合城市总体发展规划和城市工业发展规划。为避免协同处置水泥企业贮存危险废物在发生洪涝灾害时被浸泡或冲散，协同处置水泥企业所在区域应没有受到洪水、潮水或内涝威胁。设施所在标高应位于重现期不小于 100 年一遇的洪水位之上，并建设在长远规划中的水库等人工蓄水设施的淹没区和保护区之外。

本节 4.3 条规定了应有专门危险废物贮存设施，危险废物应在该专门设施中贮存。危险废物贮存设施的设计和安全防护应严格遵守危险废物专用贮存设施的管理要求，即应满足 GB 18597 和 HJ/T 176 中 5.3 条的要求。

危险废物种类特性不同，投加设施位置、类型、特点也不同，因此，本节 4.4 条规定了废物应根据所需协同处置的危险废物种类特性设置专用废物投加设施，投加设施应满足《水泥窑协同处置危险废物环境保护技术规范》(HJ □□□□) 中的“废物投加设施”要求。

本节 4.5 条规定了应采用适宜的预处理装置对危险废物进行必要的预处理。危险废物的预处理对于在水泥窑内进行协同处置是非常重要的，以保证危险废物的理化特性满足入窑要求，从而避免对水泥生产和危险废物无害化处置产生不利影响。

8.5 入窑协同处置危险废物特性

本标准第 5 节规定了适合协同处置的废物特性要求。

8.5.1 禁止在水泥窑中协同处置的废物

本节 5.1 条规定了禁止在水泥窑中协同处置的废物。

(1) 放射性废物

通常放射性废物排除在常规废物之外，其处理程序受专门的核废物相关法律法规制约，必须有特定的许可。由于放射性废物对协同处置操作过程和水泥产品会造成不可控或未知的风险，因此不适合在水泥窑进行协同处置。

(2) 爆炸物及反应性废物

爆炸物和反应性废物，如硝化甘油、烟火、雷管、导火索、照明弹、弹药、

某些有机过氧化物等在运输、预处理过程中可能有超出控制的爆炸或剧烈反应风险，在水泥窑内的爆炸或剧烈反应对工艺稳定有负面影响。

(3) 未经拆解的废电池、废家用电器和电子产品

废电池包括汽车电瓶、工业电池和便携电池。汽车电瓶主要是铅酸电池，工业电池包括铅酸电石和镉镍电池，便携电池包括通用电池（主要是锌碳电池和碱锰电池）、微型纽扣电池（主要是汞、锌气、氧化银、氧化锰和锂电池）和充电电池（主要是镉镍、镍金属氢化物、锂离子和密封铅酸电池）。这些物质协同处置过程中的烟气污染排放和水泥产品环境安全性不易控制，酸性电池中的废酸可能会腐蚀设备影响水泥生产正常运行。废家用电器和电子产品中平均含有 45%（重量）的金属，其中重金属和稀有金属所占比例最高，其中的 Cl、Br、Cd、Ni、Hg、PCB 和高浓度溴化阻燃剂等对人类健康和环境有害的物质含量高，烟气污染排放和水泥产品环境安全性不易控制。因此，未经拆解废电池、废家用电器和电子产品禁止在水泥窑内协同处置。废电池更适合通过专门的废电池处理技术进行处置，废家用电器和电子产品更适合经拆解后分别加以回收利用，拆解后的塑料成分可投入水泥窑替代部分燃料，稀有贵金属进行回收。

(4) 含汞的温度计、血压计、荧光灯管和开关

温度计、血压计、荧光灯管和开关含有大量高挥发性的汞元素，在协同处置过程中的烟气污染排放不易控制，也不易通过预处理进行稀释满足汞的投加量限值，因此，禁止协同处置含汞的温度计、血压计、荧光灯管和开关。

(5) 未知特性和未经鉴定的废物

对未知或未经鉴定分析的废物进行协同处置，将会对处置过程的职业健康安全、水泥生产工艺的正常运行、烟气污染排放、水泥产品质量和环境安全性带来未知和不可控的风险。因此，未知或未经鉴定的废物禁止在水泥窑内进行协同处置。

上述各类废物不适合水泥窑协同处置的原因如表 2 所示。

表 2 不适合水泥窑协同处置的原因

废物种类	影响烟气排放	影响水泥质量	影响水泥生产运行	影响操作健康和安	有其他更优处
放射性废物		×		×	
爆炸物及			×	×	

反应性废物					
未经拆解的废电池、废家用电器和电子产品	×	×	×		×
含汞的温度计、血压计、荧光灯管和开关	×				
未知特性和未经鉴定的废物	×	×	×	×	

8.5.2 入窑协同处置的废物特性要求

本节 5.2 条和 5.3 条规定了入窑协同处置的废物的特性要求。

不应影响水泥生产过程和水泥产品质量是协同处置的原则之一，因此本节 5.2 条要求入窑废物首先应该满足水泥生产对原料或者燃料的基本特性要求，应具有稳定的化学组成和物理特性，其化学组成、理化性质等不应对水泥生产过程和水泥产品质量产生不利影响。影响水泥生产过程和水泥产品质量的化学组成和理化特性对于替代原料主要包括：含水率、灰分含量、矿物成分（CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃）含量、有害元素含量（K、Na、Mg、Cl、F、S、P、重金属等）、尺寸大小等；对于替代燃料还包括热值、C、H、O 含量、燃尽性、粘度等。

在上述这些参数中，有害元素对烟气排放和水泥产品环境安全性的影响更为显著，因此，本节 5.3 条规定入窑废物中有害物质含量应能满足《水泥窑协同处置危险废物环境保护技术规范》（HJ □□□□）中的“入窑协同处置的废物特性要求”，该规范根据水泥窑协同处置技术特点，提出了入窑物料（包括常规原料、燃料和废物）中重金属、氯、氟、硫等有害元素的投加量或含量要求。

本节 5.4 条规定了如果废物不能满足 5.2 和 5.3 条要求，应进行适当的预处理，并满足入窑废物的标准。否则应禁止该废物在水泥窑中协同处置。

8.6 运行技术要求

本标准第 6 节规定了水泥窑协同处置危险废物的运行技术要求。

本节 6.1 条规定了废物投加点的选择和在相应投加点投加废物的要求。新型干法水泥窑有多个投加点可用于废物的投加，由于不同的投加位置具有不同的气固相温度分布，废物投入后的停留时间也不同，应此，应依据《水泥窑协同处置危险废物环境保护技术规范》（HJ □□□□）中的“投加的技术要求”，选择合适的废物投加位置和投加方法。

水泥窑的主要功能是生产水泥，水泥窑协同处置危险废物不能影响水泥正常生产是协同处置的基本原则之一，同时，水泥生产不正常时，危险废物的无害化处置效果也得不到保证，因此，6.2 条规定了废物的投加过程 and 在水泥窑中的协同处置过程不应影响水泥的正常生产产生不利影响。

水泥生产规模大、惯性大，水泥生料从进入预热器到出窑需 1 小时左右，水泥窑运行从非稳态（如窑启动、故障、关闭）到稳态的转变所需的时间较长，生产过程中各种控制信息（如温度、压力、浓度等）的传输和反馈也难免存在一定的延迟。水泥窑在较长时间内都能保持正常运行工况时，才能确保水泥窑系统真正达到常态稳定运行工况，而不是暂时稳定状态。根据多次中试试验表明，水泥窑达到正常生产工况并稳定运行至少四小时后才可称为常态稳定运行工况，因此 6.3 条规定了水泥窑达到正常生产工况并稳定运行四小时后开始投加危险废物。

只有在水泥窑保持正常运行工况的前提下，水泥窑内的气固相温度和停留时间才能保证危险废物的无害化处置，因此本节 6.4 条规定在发现水泥窑运行工况不正常，特别是窑内温度明显下降，或者烟气中污染物浓度明显升高时，应停止或者逐渐停止投加危险废物，待查明原因并恢复正常后恢复投料。

本节 6.5 条规定了协同处置水泥企业生产的水泥产品的环境保护质量应满足我国正在同时编制的《固体废物生产水泥污染控制标准》的要求，以控制水泥产品由于其中的重金属浸出导致的环境污染风险。

8.7 大气污染物排放限值

本标准第 7 节规定了水泥窑协同处置危险废物时的大气污染物排放的控制项目和排放限值。

8.7.1 大气污染物排放控制项目设置的依据

水泥生产过程中的水泥煅烧系统是最重要的大气污染物排放源，产生的污染物种类很多，包括颗粒物、NO_x、SO₂、HCl、HF、二噁英类、重金属等。

美国和欧洲的水泥窑协同处置危险废物标准中的烟气排放控制项目见表 3。可以看出，美国和欧盟标准中的控制项目均包括颗粒物和二噁英类，但美国标准中的控制项目不包括 SO₂、NO_x、HF 等常规指标，重金属的种类和归类也与欧盟标准不同。我国《危险废物焚烧污染控制标准》（GB18484-2001）中设置的污

染控制项目基本与欧盟相似，仅缺少 TOC 和两种重金属。

表 3 欧美水泥窑协同处置危险废物标准及 GB18484-2001 中的大气污染物控制项目

美国标准	欧盟标准	GB18484
颗粒物	颗粒物	颗粒物
—	SO ₂	SO ₂
—	NO _x	NO _x
总氯 (HCl+Cl ₂)	HCl	HCl
—	HF	HF
Hg	Hg	Hg
Pb+Cd	Tl+Cd	Cd
—	—	As+Ni
—	—	Pb
As+Be+Cr	Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V	Cr+Sn+Sb+Cu+Mn
二噁英类	二噁英类	二噁英类
CO ⁽¹⁾	—	CO
HC ⁽²⁾	TOC	—
烟气不透明度	—	烟气黑度

注：(1) CO 排放限值需与 HC 标准同时使用；

(2) 指碳氢化合物，以丙烷计。

(1) 常规大气污染物指标

根据水泥窑大气污染物排放标准 GB 4915，水泥正常生产过程中的烟气污染控制指标主要包括颗粒物、SO₂、NO_x、氟化氢等四项。水泥窑协同处置的烟气排放指标首先应设置这些常规的大气污染物指标。由于水泥窑排放的烟气中 Cl 元素主要以 HCl 形态存在，Cl₂ 的比例很小，因此本标准参照欧盟标准仅将 HCl 纳入控制项目。

(2) 重金属

根据德国水泥研究所对微量元素在水泥回转窑系统的挥发性，将元素划分为四类如表 4 所示。

表 4 微量元素在水泥窑内的挥发性分级

等级	元素	冷凝温度/°C
不挥发	Ba,Be,Cr, ,Ni,V,Al,Ti,Ca,Fe,Mn,Cu,Ag	—
半挥发	As ⁽¹⁾ ,Sb,Cd,Pb,Se,Zn,K,Na	700-900
易挥发	Tl	450-550
高挥发	Hg	<250

注：(1) As 在原文献中归于不挥发性元素，但本研究中发现，As 在水泥窑内的挥发率达 10%左右，因此本研究中将 As 归为半挥发性元素。

a) 不挥发类元素与熟料中的主要元素钙、硅、铝及铁和镁相似，完全被结

合到熟料中。这类元素 99.9%以上直接进入熟料。

b) 半挥发类元素在水泥熟料煅烧过程中，首先形成硫酸盐和氯化物。这类化合物在 700-900℃温度范围内冷凝，在窑和预热器系统内形成内循环，最终几乎全部进入熟料，随烟气带入带出窑系统外的量很少。例如 Pb 和 Cd 在气固混合充分的悬浮预热窑内被熟料吸收的比例高于气固混合较弱的半干法窑上被熟料吸收的比例。

c) 物料中易挥发的元素 Tl 于 520-550℃开始蒸发，在窑尾物理温度 850℃的温度区主要以气相存在，一般不被带回转窑烧成带，随熟料带出的比例小于 5%。蒸发的 Tl 一般在 450-500℃的温度区冷凝，93%-98%都滞留在预热器系统内，其余部分可随窑灰带回窑系统，随废气排放的量少。

d) 高挥发元素 Hg 在约 100℃温度下完全蒸发，所以不会结合在熟料中，在预热器系统内不能冷凝和分离出来，主要是凝结在窑灰上或随窑废气带走形成外循环和排放。在悬浮预热窑上，130℃时 Hg 通过凝结在窑灰上的分离率可达约 90%。利用窑废气进行粉磨烘干作业时更有利于提高 Hg 在废气中的分离率。

重金属在水泥窑内的挥发性、分配系数受重金属的存在形态、窑内气氛、除尘设备等多种因素影响。德国水泥企业协会（VDZ）经计算所得的重金属在悬浮预热回转窑内的排放系数和转化系数如表 5 所示，排放系数指燃料和原料中的重金属随烟气排入大气的比例，转化系数仅指燃料中的重金属随烟气排入大气的比例。因此，水泥窑在协同处置危险废物的过程中，由于危险废物入窑带入的重金属将不同程度地挥发并排放到烟气中，如果控制不当势必造成对环境的污染。

表 5 VDZ 测得的重金属排放系数和转化系数

元素	排放系数/%	转化系数/%
Cd	<0.01-<0.2	0.002
Pb	<0.01-<0.2	0.002
Tl	<0.01-<0.1	0.02
Sb	<0.01-0.05	0.0005
As	<0.01-<0.02	0.0005
Mn	<0.001-<0.01	0.0005
Co	<0.01-<0.05	0.0005
Cu	<0.01-<0.05	0.0005
Cr	<0.01-<0.05	0.0005
Ni	0.01-<0.05	0.0005
V	0.01-<0.05	0.0005
Sn	0.01-<0.05	0.0005
Zn	0.01-<0.05	0.0005

虽然美国、欧盟标准与我国 GB18484 控制的重金属种类有所不同，根据上述对重金属挥发性的分级和描述，本着从严原则，本标准在我国 GB18484 控制的 10 种重金属种类之外，还将上述欧美标准中的 Tl、Be、Co、V 等重金属全部纳入本标准，即包括 Hg、Tl、Cd、Pb、As、Be、Cr、Co、Sn、Sb、Cu、Mn、Ni 和 V 总计 14 种重金属。

(3) 总有机碳 (TOC)

在水泥窑正常燃烧的工况下，由燃料带入的有机物能全部被分解烧掉，废气中的一氧化碳和有机组分主要来源于原料中的有机碳。通常情况下，每生产 1kg 熟料，由常规原料带入的有机碳为 1.5g-6g。原料中的有机碳随着温度升高相继进入气相，并以 CO、CO₂ 和气相有机化合物形式存在。在 3%O₂ 存在条件下，生料中约 85%—95%的有机碳转变为 CO₂，5%—15%转变成 CO，以气相有机化合物存在的不足 1%，即使增加氧供给量，对降低由原料产生的 CO 量已不再起作用。因此，水泥窑 CO 的排放浓度更多反映的是生料中有机碳的差异，若采用 CO 排放浓度衡量水泥窑燃烧状况将受生料特性差异的强烈干扰。由于上述原因，欧盟仅规定了 TOC 的排放限值，美国虽规定了 CO 的排放限值，但该排放限值需与 HC 排放限值同时使用。因此，本标准不将 CO 作为评价水泥窑燃烧状况和有机物在水泥窑内分解是否彻底的指标，而是参考欧盟标准，将 TOC 作为相应的评价指标。

(4) 二噁英

在水泥窑内的高温氧化气氛下，由燃料带入的二噁英会彻底分解，因此水泥窑内的二噁英主要来自于窑系统内二噁英的合成反应，或是在少数情况下，来自于从低温段加入的含二噁英的原料。新型干法水泥窑从预热器上部至除尘设备内的烟气温度和停留时间满足二噁英合成的温度和时间要求；燃料的不完全燃烧和原料中含有的有机物会提供二噁英合成所需的碳氢化合物，这些碳氢化合物在预热器内与由原料和燃料带入的 Cl 元素发生反应生成二噁英合成的前驱物；由燃料和原料引入重金属起到了催化剂的作用；气固相的充分接触提为二噁英合成提供了充足的颗粒反应表面。因此，水泥窑内的二噁英主要来自在窑系统低温部位（预热器上部、增湿塔、磨机、除尘设备）发生的二噁英合成反应。目前，国内外有关焚烧设施的烟气排放指标的设置均将二噁英类纳入控制项目。

(5) NH₃

通常情况下，水泥窑内为氧化气氛，排放烟气中 NH₃ 含量极少，欧盟、美国水泥窑协同处置标准中均未规定 NH₃ 的排放限值。目前我国的《水泥窑大气污染物排放标准》（GB 4915）正在同时修订，为考虑到与该标准的衔接，本标准将也 NH₃ 作为水泥窑大气污染物排放控制项目之一。

综上所述，本标准的大气污染物排放控制项目如下：颗粒物、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、氟化氢(HF)、氯化氢(HCl)、14种重金属(汞、铊、镉、砷、铅、铍、铬、钴、锡、锑、铜、镍、锰和钒)及其化合物、TOC、二噁英类、NH₃。

8.7.2 排放标准限值的制定依据

8.7.2.1 颗粒物

水泥窑的除尘设备的类型和操作运行是决定烟气中颗粒物排放浓度的关键因素。目前，用于水泥窑的除尘设备主要分为布袋除尘器(FF)和静电除尘器(ESP)两大类。

国外通常要求使用静电或布袋除尘器的排放浓度控制在 50mg/Nm³ 以下，我国排放现状要高一些，这与我国目前的标准严格程度有关（97年后新建水泥厂的要求为 100mg/Nm³）。从美国的烟气排放数据的统计来看，采用 FF 的水泥窑的烟气颗粒物浓度的平均值为 25.5mg/Nm³，而采用 ESP 的水泥窑则为 51.5 mg/Nm³（见附表 1）。采用布袋除尘器的水泥窑的烟气颗粒物的排放浓度均大大低于采用静电除尘器的水泥窑。据欧洲 2006 年的监测数据，采用静电除尘设施的水泥窑粉尘排放浓度在 10-30mg/Nm³ 之间，而采用布袋除尘设施的水泥窑粉尘排放浓度在 10-20mg/Nm³ 之间。欧盟 IPPC（综合污染预防与控制）指令（96/61/EC）关于《水泥制造业的最佳可用技术（BAT）与污染物排放指南》指出：采用静电除尘和布袋过滤技术，对应的排放控制水平为 20-30mg/Nm³。有一些国家（如德国、荷兰），水泥工业粉尘排放甚至要求达到 10mg/Nm³。可见水泥工业的粉尘控制更加严格、排放浓度要求更低已成为一种潮流。尤其是对于从事危险废物协同处置的水泥窑而言，粉尘中的有害成分浓度会根据所处置的废物种类会有不同程度的增加，更应该加强粉尘的排放限制。

表 6 国内外颗粒物排放标准对比⁽¹⁾ 单位: mg/Nm³

各国标准	现有设施	新建设施	备注
美国标准	54	4.44	3 次采样平均值
欧盟 2000/76/EC 指令	30	30	24 小时均值
中国水泥工业标准 (GB4915-2004)	100	50	3 次采样平均值
中国水泥工业标准 (GB4915-2012) (征求意见稿)	50	30 20 ⁽²⁾	1 小时平均值

注: (1) 表中数值均换算成标准状态下 (273K, 101.3kPa), 10%O₂ 含量的干烟气 (下同)。

(2) 指重点地区企业排放限值。

2004 年, 在制定我国《水泥工业大气污染物排放标准》时, 对我国 40 个新型干法窑样本的除尘器使用情况进行了分析, 结果表明: 有 10% 使用了布袋除尘器, 平均排放浓度 62.4mg/Nm³; 90% 使用静电除尘器, 平均排放浓度 87.6mg/Nm³。可以看出, 虽然采用布袋除尘器的水泥窑颗粒物排放平均浓度仍较高, 原因是在 2004 年之前我国水泥工业对水泥窑颗粒物排放要求不高, 根据《水泥厂大气污染物排放标准》(GB 4915-1996) 中规定的最严格的一级排放限值为 150mg/Nm³。因此, 企业不会选用除尘效率高的布袋类型即可满足要求。目前, 我国水泥企业使用布袋除尘器的比例已升至约 50% 左右。从 3 个示范企业的监测结果看 (见表 7), 试点企业 B 的水泥窑采用的静电除尘器, 颗粒物的排放浓度基本与美国静电的平均排放浓度相似, 为 50mg/Nm³ 左右。而试点企业 A 和 C 均采用了布袋除尘器, 颗粒物的排放浓度都很低, 达到 5mg/Nm³ 以下, 除尘效果很好。

从美国截至 1999 年的水泥窑排放数据的分析统计可以看出, 80% 的水泥窑设施能满足粉尘平均排放浓度是 40.67mg/Nm³ (见附表 3-3), 而欧盟的排放限值为 30mg/Nm³。因此, 本标准以 30mg/Nm³ 作为现有水泥窑设施的排放限值, 与欧盟相同, 但为方便监督性监测并与现有的《固定源废气监测技术规范》(HJ/T 397), 采用 1 小时均值, 相比欧盟的 24 小时均值略微严格。基本上只有危险废物协同处置的水泥窑配备布袋除尘设施并对除尘器进行较好的维护和管理才能满足排放标准的要求, 符合本标准制定的原则。为与《水泥工业大气污染物排放标准》衔接, 对于重点地区, 共处置水泥窑的颗粒物排放限值也规定为 20 mg/Nm³。

表 7 实际颗粒物排放监测数据 单位: mg/Nm³

试点企业	协同处置废物类型	除尘器类型	空白	协同处置危险废物

试点企业 A	废弃农药	布袋除尘 (FF)	1.60	1.33
试点企业 B	含油白土	静电除尘 (ESP)	51.79	46.9
试点企业 C	DDT 污染土壤	布袋除尘 (FF)	3.95	4.13

8.7.2.2 二氧化硫

从 SO₂ 的产生来源分析,原料带入的易挥发性硫化物是造成 SO₂ 排放的主要根源。回转窑燃料燃烧产生的 SO₂ 在窑内碳酸盐分解区即可被碱性物质吸收而生产硫酸盐,硫酸盐挥发性小于氯化物,仅少部分在窑内形成内循环,80%以上随熟料排出窑外,不会对烟气中 SO₂ 的排放造成显著影响。在窑磨一体机的模式下,烟气经生料磨后再排入大气,则生料磨系统中新形成的活性表面及潮湿气氛有利于 SO₂ 的吸收,因此可以大大降低 SO₂ 的排放。由于水泥窑烟气排放中的 SO₂ 主要是由原料中所含的硫化物决定的,限制含硫化物的原料从配料系统投加速率是控制烟气中二氧化硫排放浓度的有效办法。

2004 年欧盟 25 个成员国的 253 个水泥窑的监测数据统计结果表明,SO₂ 的排放浓度在 0-4837mg/Nm³ 之间变化,平均浓度为 218.9mg/Nm³。从 3 个示范企业的监测结果看,试点企业 B 水泥窑的 SO₂ 的排放浓度较高外,其余 2 个水泥窑的 SO₂ 的排放浓度均非常低,在 5mg/Nm³ 以下。

由于尾气排放中的 SO₂ 主要是受到水泥生产原料中易挥发性硫化物含量的影响,因此,排放标准可参照我国《水泥工业大气污染物排放标准》中的限值。

表 8 试点企业 SO₂ 的实际排放监测数据 单位: mg/Nm³

试点企业	协同处置废物类型	空白	协同处置危险废物
试点企业 A	废弃农药	<2.5	<2.5
试点企业 B	含油白土	90.33	341.51
试点企业 C	DDT 污染土壤	<3.6	<3.8

表 9 国内外 SO₂ 排放标准的对比 单位: mg/Nm³

各国标准	现有设施	新建设施	备注
美国标准	—	—	
欧盟 2000/76/EC 指令	50 ⁽²⁾	50 ⁽²⁾	24 小时均值
中国水泥工业标准 (GB4915-2004)	200	200	3 次采样平均值
中国水泥工业标准 (GB4915-2012) (征求意见稿)	200	100 50 ⁽²⁾	1 小时均值

注: (1) 若 SO₂ 并非由废物产生时,经当地管理机构批准可不受该排放限值限制。

(2) 指重点地区企业排放限值。

8.7.2.3 .NO_x

NO_x 是指 NO 与 NO₂ 的混合气体。在水泥熟料煅烧过程中，NO_x 的产生主要来源于大量空气中的 N₂，以及高温燃料中的氮和原料中的氮化合物。在水泥回转窑系统中主要生成 NO（占 90%左右），而 NO₂ 的量不到足混合气体总质量的 5%。主要有两种形成机理：热力型 NO_x；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。一些新型干法窑采取了低 NO_x 排放设计，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 500mg/Nm³ 以下。目前采用的 NO_x 控制技术有火焰冷却、低 NO_x 燃烧器、分段燃烧、添加矿化剂、选择性非催化减量技术（SNCR）、选择性催化减量技术（SCR）。欧洲认为使用这些技术措施后（SCR 除外），排放控制水平应达到 200-500mg/Nm³，若使用 SCR 技术，则可进一步控制在 100-200mg/Nm³。2004 年欧盟 25 个成员国水泥窑的监测数据统计分析结果表明，NO_x 的排放浓度在 145-2040mg/Nm³ 之间变化，平均浓度为 785mg/Nm³。

从 NO_x 的产生来源分析来看，NO_x 的排放基本不受到焚烧危险废物的影响。因此，排放标准可参照我国《水泥工业大气污染物排放标准》中的限值。

表 10 试点企业的 NO_x 实际排放监测数据 单位：mg/Nm³

试点企业	协同处置废物类型	空白	协同处置危险废物
试点企业 A	废弃农药	—	—
试点企业 B	含油白土	316	373
试点企业 C	DDT 污染土壤	485	430

表 11 国内外 NO_x 排放标准的对比 单位：mg/Nm³

各国标准	现有设施	新建设施	备注
美国标准	—	—	
欧盟 2000/76/EC 指令	800	500	24 小时均值
中国水泥工业标准（GB4915-2004）	800	800	3 次采样平均值
中国水泥工业标准（GB4915-2012） （征求意见稿）	800 450 ⁽¹⁾	320 ⁽²⁾	1 小时均值

注：（1）指现有设施自 2015 年 1 月 1 日起应执行的排放限值。

（2）指新建设施或重点地区设施。

8.7.2.4 氟化氢

水泥窑产生烟气中的氟化物主要为 HF，HF 主要来自于原燃料，如黏土中的

氟，以及含氟矿化剂（CaF₂）。含氟原燃料在烧成过程形成的 HF 会与 CaO, Al₂O₃ 形成氟铝酸钙固溶于熟料中帶出窑外，90-95%的 F 元素会随熟料帶入窑外，剩余的 F 元素以 CaF₂ 的形式凝结在窑灰中在窑内进行循环，极少部分随尾气排放。

控制 HF 的排放，最主要的方法是限制含氟原燃料的投加速率。由于 F 主要是在窑内形成内循环和随熟料排出窑外，随尾气排入大气的比例很小，因此对含 F 元素投加速率的限制主要是考虑 F 对熟料烧成和熟料质量的影响，以及碱金属 F 化物窑内内循环造成的结皮不影响工况运行。

2004 年欧盟 25 个成员国 28 个水泥窑的监测数据表明，HF 的排放浓度在 0-1.0mg/Nm³ 之间变化，平均浓度为 0.3 mg/Nm³。3 个示范企业的监测结果中，试点企业的 HF 的排放浓度均低于 1.0mg/Nm³。由于焚烧危险废物设施的运行管理非常重要，在制定标准时应要求协同处置危险废物的水泥企业具有较高的管理水平。因此，排放标准可参照欧洲水泥工业大气污染物排放标准，即 HF 的排放浓度控制在 1.0mg/Nm³ 以下，为方便监督性监测并与现有的《固定源废气监测技术规范》（HJ/T 397），仍采用 1 小时均值，相比欧盟的 24 小时均值略微严格。

表 12 试点企业的 HF 实际排放监测数据 单位：mg/Nm³

试点企业	协同处置废物类型	空白	协同处置危险废物
试点企业 A	废弃农药	—	—
试点企业 B	含油白土	0.10	0.11
试点企业 C	DDT 污染土壤	0.44	0.35

表 13 国内外 HF 排放标准的对比 单位：mg/Nm³

各国标准	现有设施	新建设施	备注
美国标准	—	—	
欧盟 2000/76/EC 指令	1.0	1.0	24 小时均值
中国水泥工业标准（GB4915-2004）	10	5	3 次采样平均值
中国水泥工业标准（GB4915-2012） ⁽¹⁾ （征求意见稿）	5	5 3 ⁽²⁾	1 小时均值

注：（1）指氟化物（以总氟计）；

（2）指重点地区企业排放限值。

8.7.2.5 总有机碳（TOC）

由于提高窑系统中的氧含量并不能降低由原料产生的总有机碳含量，即使水泥回转窑已达到了最佳燃烧条件，在排放废气中仍有可能含有较多的来自原料中的有机碳。因此，控制尾气中 TOC 含量，主要是控制原料中挥发性有机物含量，

含挥发性有机物较高的替代原料和燃料，不应从低温段加入窑系统。另一方面，要保持窑内最佳燃烧条件，工况稳定，以保证燃料充分燃烧，由燃料带入的有机物分解彻底。

2004 年欧盟国家 120 个水泥窑的监测数据表明，TOC 的排放浓度在 1.0-122.6mg/Nm³ 之间变动，平均值为 22.8mg/Nm³。由于 TOC 的排放浓度同时受生料中有机碳含量的影响，因此，为准确评估水泥窑燃烧状况及有机废物在水泥窑内的分解状况，欧盟标准提出，若某水泥窑的 TOC 并非由废物产生时，经当地管理机构批准，该水泥窑可不受该标准中 TOC 排放限值（10mg/Nm³）的限制。

并规定该 TOC 增加值不得超过 10mg/Nm³。我国的 3 个示范企业的监测结果表明，协同处置危险废物排放的 TOC 的排放浓度与空白测试的差值均低于 4.0 mg/Nm³。因此，参考欧盟的方法，本标准以协同处置废物比常规水泥生产时的 TOC 排放浓度增加值作为评估水泥窑燃烧状况及有机废物在水泥窑内的分解状况的指标，规定 TOC 的排放标准限值（即水泥窑协同处置危险废物相比常规水泥生产所增加的 TOC 的排放浓度）为 10mg/Nm³。

表 14 试点企业的 TOC 实际排放监测数据 单位：mg/Nm³

试点企业	协同处置废物类型	空白	协同处置危险废物
试点企业 A	废弃农药	6.23	0.89
试点企业 B	含油白土	1.83	2.0
试点企业 C	DDT 污染土壤	2.1	5.83

表 15 国内外 TOC 排放标准的对比 单位：mg/Nm³

各国标准	现有设施	新建设施	备注
美国标准	—	—	
欧盟 2000/76/EC 指令	10 ⁽¹⁾	10 ⁽¹⁾	24 小时均值

注：（1）若 TOC 并非由废物产生时，经当地管理机构批准可不受该排放限值限制。

8.7.2.6 氯化氢（HCl）

水泥窑产生的 HCl 主要来自于含氯的原燃料在烧成过程中形成的 HCl。由于水泥窑中具有强碱性环境，HCl 在窑内与 CaO 反应生成 CaCl₂ 随熟料带出窑外，或与碱金属氧化物反应生成 NaCl、KCl 在窑内形成内循环而不断积蓄。通常情况下，97%以上的 HCl 在窑内会被碱性物质吸收，随尾气排放到窑外的量很少，

只有当原料中 Cl 元素添加速率过大，或窑内 NaCl、KCl 内循环累计到一定程度而达到原料带入量与随尾气和熟料排出量达到平衡后，随尾气排出的 HCl 可能会增加。

控制 HCl 的排放，最主要的方法是限制含 Cl 原燃料的投加速率。由于 Cl 主要是在窑内形成内循环和随熟料排出窑外，以 HCl 或 Cl₂ 随尾气排入大气的比例很小，因此对含 Cl 元素投加速率的限制主要是考虑熟料中 Cl 含量满足标准，以及碱金属氯化物窑内内循环造成的结皮不影响工况运行。

从美国水泥窑 1999 年之前的排放数据统计来看，新型干法窑平均排放浓度（15.7ppmv≈19.5mg/Nm³(标况，10%O₂ 含量，下同)）低于湿法长窑（38.6ppmv≈48.1mg/Nm³），而采用 FF 的水泥窑平均排放浓度（27.7ppmv≈34.5mg/Nm³）低于采用 ESP 的水泥窑（45.08ppmv≈56.1mg/Nm³）。2004 年欧盟 25 个成员国 98 个水泥窑的监测数据表明，HCl 的排放浓度在 0.02-20mg/Nm³ 之间变化，平均浓度为 4.26mg/Nm³。

在制定标准时应要求协同处置危险废物的水泥窑要求较高的管理水平。因此，排放标准可参照欧洲水泥工业大气污染物排放标准中的限值，即 HCl 的排放浓度控制在 10mg/Nm³ 以下，为方便监督性监测并与现有的《固定源废气监测技术规范》（HJ/T 397），仍采用 1 小时均值，相比欧盟的 24 小时均值略微严格。

表 16 试点企业的实际排放监测数据 单位：mg/Nm³

试点企业	协同处置废物类型	空白	协同处置危险废物
试点企业 A	废弃农药	0.13	0.09
试点企业 B	含油白土	0.32	0.39
试点企业 C	DDT 污染土壤	1.32	1.55

表 17 国外排放标准对比 单位：mg/Nm³

试点企业	现有设施	新建设施	备注
美国标准	149.4	107.1	3 次采样平均值
欧盟 2000/76/EC 指令	10	10	24 小时均值

8.7.2.7 汞及其化合物（以 Hg 计）

Hg 属于高挥发元素，在约 100℃ 温度下完全蒸发，所以不会结合在熟料中，在预热器系统内不能冷凝和分离出来，主要是凝结在窑灰上或随窑废气带走形成外循环和排放。在悬浮预热器窑上，130℃ 时 Hg 通过凝结在窑灰上的分离率可

达约 90%。

2004 年欧盟 25 个成员国 306 个水泥窑的监测数据表明，Hg 的排放浓度在 0-0.57mg/Nm³ 之间变化，平均浓度为 0.02mg/Nm³。

从美国截至 1999 年的水泥窑排放数据的分析统计可以看出，80%的水泥窑设施能满足粉尘排放的限值是 0.058mg/Nm³。3 个示范企业的监测结果中 Hg 的排放浓度均非常低，几乎监测不到。因此，排放控制在 0.05mg/Nm³ 以下。该排放标准限值与欧洲水泥窑共焚烧废物的污染物排放标准的限值一致。

表 18 试点企业的实际排放监测数据 单位：mg/Nm³

试点企业	协同处置废物类型	空白	协同处置危险废物
试点企业 A	废弃农药	<0.0005	<0.0005
试点企业 B	含油白土	<2.4×10 ⁻⁶	<2.6×10 ⁻⁶
试点企业 C	DDT 污染土壤	<0.0000036	<0.0000038

表 19 国外排放标准对比 单位：mg/Nm³

各国标准	现有设施	新建设施	备注
美国标准	0.1	0.1	3 次采样平均值
欧盟 2000/76/EC 指令	0.05	0.05	0.5-8 小时采样周期内均值

8.7.2.8 铊、镉、铅和砷及其化合物（以 Tl+Cd+Pb+As 计）

铊、镉、砷和铅及其化合物属于半挥发性金属，在水泥窑协同处置过程中这些金属大多数固定在水泥熟料中，但少部分通过烟气排放，约在 0.5-10%之间。

2004 年欧盟 25 个成员国 262 个水泥窑的监测数据表明，Cd 和 Tl 的排放浓度在 0-0.68mg/Nm³ 之间变化，平均浓度为 0.02mg/Nm³。从美国截至 1999 年的水泥窑 Cd 和 Pb 排放数据的分析统计可以看出，80%的水泥窑设施能满足粉尘排放的限值是 0.573mg/Nm³。

美国水泥窑协同处置危险废物的排放标准（Pb+Cd）为 0.15-0.28mg/Nm³，而欧洲标准（Tl+Cd）为 0.05mg/Nm³。但是根据我国三个示范企业的监测结果，发现铊、镉、砷和铅（Tl+Cd+Pb+As）及其化合物的排放浓度均相对较高，这可能与我国水泥窑的原料和特点决定的，但排放浓度均在 1.0mg/Nm³ 以下。因此，本标准要求协同处置危险废物的水泥窑的烟气中铊、镉、砷和铅及其化合物的排放浓度应不高于 1.0mg/Nm³ 的水平。

表 20 试点企业的实际排放监测数据 单位: mg/Nm³

试点企业	协同处置废物类型	空白	协同处置危险废物
试点企业 A	废弃农药	0.268	0.763
试点企业 B	含油白土	0.657	0.782
试点企业 C	DDT 污染土壤	0.337	0.294

表 21 国外排放标准对比 单位: mg/Nm³

各国标准	现有设施	新建设施	备注
美国标准 (Pb+Cd)	0.28	0.15	3 次采样平均值
欧盟 2000/76/EC 指令 (Tl+Cd)	0.05	0.05	0.5-8 小时采样周期内均值

8.7.2.9 铍、铬、锡、锑、铜、镍、锰和钒及其化合物 (以 Be+Cr+Sn+Sb+Cu+Co+Ni+Mn+V 计)

铍、铬、锡、锑、铜、镍、锰和钒及其化合物属于不挥发性金属,在水泥窑协同处置过程中这些金属绝大多数均固定在水泥熟料中,通过烟气排放的浓度非常低,约占 0.01-0.05%之间。

2004 年欧盟 25 个成员国 287 个水泥窑的监测数据表明, Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V 的排放浓度在 0-4.0mg/Nm³ 之间变化, 平均浓度为 0.14mg/Nm³。

我国危险废物焚烧污染控制标准 (GB18484-2001) 中规定的铬、锡、锑、铜、锰及其化合物的最大排放限值为 4.0。由于水泥窑熟料煅烧过程对于这些金属具有很好的固定作用, 美国水泥窑协同处置危险废物的排放标准 (As+Be+Cr) 为 0.05mg/Nm³, 而欧洲标准 (Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V) 为 0.5mg/Nm³。此外, 我国三个示范企业的监测结果表明, 铍、铬、锡、锑、铜、钴、镍、锰和钒及其化合物的排放浓度均在 0.5mg/Nm³ 以下。因此, 综合分析该项指标的排放浓度限确定为 0.5mg/Nm³, 可较好地控制该类金属的烟气排放。

表 22 试点企业的实际排放监测数据 单位: mg/Nm³

试点企业	协同处置废物类型	空白	协同处置危险废物
试点企业 A	废弃农药	<0.089	<0.040
试点企业 B	含油白土	<0.086	<0.060
试点企业 C	DDT 污染土壤	<0.167	<0.140

表 23 国外排放标准对比 单位: mg/Nm³

各国标准	现有设施	新建设施	备注
美国标准 (As+Be+Cr)	0.05	0.05	3 次采样平均值
欧盟 2000/76/EC 指令 (Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V)	0.5	0.5	0.5-8 小时采样 周期内均值

8.7.2.10 二噁英

2004 年欧盟 25 个成员国 243 个水泥窑的监测数据表明, 二噁英的排放浓度在 0-0.27ng-TEQ/Nm³ 之间变化, 平均浓度为 0.016ng-TEQ/Nm³。根据欧洲大量数据表明, 水泥窑是否共焚烧危险废物并不影响二噁英的排放浓度, 而主要是决定于水泥窑本身的设计和运行管理水平。欧洲较高的焚烧危险废物的水泥窑管理水平将二噁英的排放水平基本控制在 0.1ng-TEQ/Nm³ 以下。因此, 在制定二噁英的排放标准时应要求协同处置危险废物的水泥窑具有较高的管理水平。我国现有的《水泥工业大气污染物排放标准》(GB4915-2004) 中也规定了水泥窑协同处置危险废物时二噁英的排放应控制在 0.1ng-TEQ/Nm³ 以下。三个试点企业的监测结果也表明水泥窑烟气二噁英排放均低于 0.1ng-TEQ/Nm³。因此, 确定水泥窑烟气二噁英排放控制在 0.1ng-TEQ/Nm³ 以下, 这与欧洲水泥窑共焚烧废物的大气污染物排放标准中的限值一致。

表 24 试点企业的实际排放监测数据 单位: ng-TEQ/Nm³

试点企业	协同处置废物类型	空白	协同处置危险废物
试点企业 A	废弃农药	0.0237	0.0488
试点企业 B	含油白土	0.0048	0.0079
试点企业 C	DDT 污染土壤	0.1167	0.0077

表 25 国外排放标准对比 单位: ng-TEQ/Nm³

各国标准	现有设施	新建设施	备注
美国标准	0.17 0.34 (除尘器入口温度不高于 204℃ 时)	0.17 0.34 (除尘器入口温度不高于 204℃ 时)	3 次采样平均值
欧盟 2000/76/EC 指令	0.1	0.1	6-8 小时采样周期内 均值

本标准 7.3 条规定了协同处置危险废物的水泥窑在运行过程中发生故障或事故以及系统启动、关闭期间水泥窑大气污染排放未达到本标准要求的最大时间。系统启动、关闭和故障时污染物的产生量可能增大并超过排放标准, 因此, 应限

制在系统故障、事故、启动、关闭期间水泥窑大气污染物排放未达到本标准要求的时间。参照美国和欧盟的标准要求，每次系统发生故障或事故以及启动、关闭期间水泥窑大气污染排放未达到本标准要求的持续时间不应超过 4 小时，每年系统发生故障或事故以及启动、关闭期间水泥窑大气污染物排放未达到本标准要求的时间累计不应超过 60 小时。

本标准 7.4 条规定了协同处置危险废物的水泥生产企业除水泥窑排气筒外的其他原料、产品的加工、贮存、生产设施的排气筒大气污染物排放限值应遵循的 GB4915 的相关要求。

8.7.2.11 氨 (NH₃)

参照《水泥工业大气污染物排放标准》(GB4915-2012)(征求意见稿), NH₃ 的排放限值为 8mg/Nm³, 且仅适用于水泥窑烟气脱硝使用含氨还原剂的情况。

9 监测要求

本标准第 8 节规定了水泥窑协同处置危险废物过程中对监督监测的要求, 包括尾气监测、水泥产品检测和水泥窑协同处置设施的性能测试。

9.1 尾气监测

本标准 8.1 节规定了尾气监测的要求。

8.1.1 条规定了烟气采样点的设置要求和采样条件要求。协同处置危险废物和常规水泥生产的烟气采样点设置和采样条件相同。

本标准 8.1.2 条规定了连续监测指标和要求。水泥窑协同处置危险废物时, 由于危险废物均质性一般不如常规水泥原料, 难免会造成烟气中各种排放物浓度的瞬时波动, 因此烟气监测应尽量采用连续在线监测设备。欧盟指令规定, 水泥窑协同处置废物时, NO_x、CO、颗粒物、TOC、HCl、HF、SO₂、O₂ 应执行连续在线监测; 在一定条件下, HF、SO₂ 也可执行定期监测; 重金属、二噁英、PAH 等目前还不具备连续在线监测条件, 目前执行定期监测, 但应尽快做到连续在线监测。美国标准规定, 水泥窑协同处置危险废物时, CO、HC、不透明度应采用连续在线监测; 其他烟气排放物不要求连续在线监测, 主要通过监测工况操作参数替代直接监测烟气排放浓度, 但重金属、HCl、Cl₂ 也可根据情况申请连续在线监测。综合欧盟的情况可以看出, CO、颗粒物、SO₂、NO_x、HCl、HF 已有能

力做到在线连续监测，通过对国内水泥厂的考察发现，国内污染控制水平较高的水泥企业也有能力做到颗粒物、SO₂、NO_x、HCl 的在线连续监测。为确保危险废物协同处置的安全性，只有达到一定技术水平和污染控制水平的水泥企业才能开展危险废物协同处置业务，因此，本标准 8.1.2 条规定颗粒物、NO_x、SO₂、HCl 应执行在线监测。

本标准 8.1.3 和 8.1.4 条规定了 TOC、重金属、HF 和二噁英类的监测要求。TOC、重金属、HF 和二噁英目前还没有能力做到连续在线监测，因此执行定期监测。参照欧盟指令，重金属和 HF 的监测频次每年不少于 4 次，TOC 由于目前在我国还很难达到在线监测，因此其监测频率也采用每年不少于 4 次。上述监测由协同处置企业执行，对于环保部门的监督性监测，应按《固定源废气监测技术规范》(HJ/T397) 的有关规定执行。二噁英类监测频率参照《危险废物(含医疗废物)焚烧处置设施二噁英排放监测技术规范》(HJ/T365-2007) 要求，每年至少一次，采样方法参照《环境空气和废气 二噁英类的测定 同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法》(HJ 77.2)。

本标准 8.1.5 条规定了尾气监测分析方法。颗粒物、SO₂、NO_x、HCl 执行在线连续监测时，其监测分析方法应按《固定污染源排放烟气连续监测系统技术要求及检测方法》(HJ/T 76) 执行，在进行监测性监测时，也可执行相应的非连续监测方法；汞、镉、铬、锡、镍、铅和砷的监测分析参照我国现有相关标准；TOC、HF 以及其他重金属的监测分析目前我国还没有相关标准，TOC 可暂时参照欧盟 EN 12619《烟气中低浓度气相总有机碳质量浓度测定-连续火焰离子化检测器法》中的方法，HF 可暂时参照《工作场所空气有毒物质测定 氟化物》(GBZ/T 160.36) 中氟化氢的测定方法，其他重金属可暂时参照中国环境科学出版社出版的《空气和废气监测分析方法》(第四版) 中的相应方法，等相应的大气固定源分析标准颁布后可替代引用。

9.2 水泥产品检测

本标准 8.2 节规定了水泥产品检测的要求。

本标准 8.2.1 条规定了协同处置企业对水泥产品环境保护品质自行检测的要求。水泥企业在常规水泥生产时需按《通用硅酸盐水泥》(GB175) 的要求对水泥产品进行取样和质量分析，为确保水泥产品到达环境保护品质要求，在对水泥

质量进行分析时,同时还需进行水泥产品环境保护指标的测试,其产品编号按《通用硅酸盐水泥》(GB175)执行,取样方法按《水泥取样方法》(GB12573)的要求对每一编号的水泥产品进行取样,按照《固体废物生产水泥污染控制标准》(GB □□□□)中要求,每次分析需样品 500g 左右,为减少样品分析的次数,本标准规定每个样品取样量 100g,每周将所取样品等量混合后按照《固体废物生产水泥污染控制标准》(GB □□□□)的中的要求检测 1 次。

本标准 8.2.2 规定了环境保护行政主管部门对重点环境污染排放源的监督性监测频次要求。

9.3 水泥窑协同处置设施的性能测试

本标准 8.3 节规定了水泥窑协同处置设施的性能测试。

协同处置企业在首次开展协同处置危险废物之前,应开展危险废物试烧测试和性能验证(临时应急处置的情况除外),试烧结果合格后方可颁发危险废物的经营许可证。试烧的目的是检验和了解协同处置所用水泥窑的污染控制水平和对有机化合物的分解破坏能力和效果。危险废物的试烧和焚毁去除率的评价程序和要求按照《水泥窑协同处置危险废物环境保护技术规范》(HJ □□□□)中的要求执行。本标准 8.3.1 条即是针对上述内容提出的。

本标准 8.3.2 条规定了对水泥窑协同处置设施进行性能测试的频次要求,参照美国水泥窑协同处置危险废物标准,性能测试频次至少每五年一次,以确保协同处置所用水泥窑对有机物的焚毁去除能力保持在较高水平。

10 主要国家、地区及国际组织相关标准研究

10.1 我国水泥窑烟气排放标准

为控制水泥工业的大气污染物排放,国家环保总局和国家质量监督检验检疫总局发布了《水泥工业大气污染物排放标准》(GB4915-2004)。该标准对水泥工业的大气污染物排放限值做了规定,是中国目前有关水泥工业大气污染排放的唯一标准。该标准适用于水泥工业生产全过程,不但涉及了水泥制造(含粉磨站)过程的大气污染物排放,还对矿山开采现场破碎、预拌混凝土和混凝土预制件生产过程颗粒物排放做了规定。由于工业废物和危险废物水泥窑协同处置技术和业务在中国还处于起步阶段,因此目前中国还没有发布专门针对工业废物和危险

废物水泥窑协同处置的污染物排放标准,而目前有关水泥工业污染物排放的唯一现有标准《水泥工业大气污染物排放标准》中虽然提及了水泥窑协同处置危险废物时某些主要污染物的排放限值,但还是引用了《危险废物焚烧污染物控制标准》(GB18484-2001),并没有考虑到水泥窑自身的特性。

10.1.1 使用常规原燃料的水泥窑

《水泥工业大气污染物排放标准》对排放进行限制的大气污染物是颗粒物、SO₂、NO_x 和氟化物,其排放限值如表 26 所示。

表 26 水泥工业大气污染物排放要求

生产设备	颗粒物		SO ₂		NO _x (以 NO ₂ 计)		氟化物 (以总氟计)	
	排放浓度 mg/m ³	单位产品排放量 kg/t	排放浓度 mg/m ³	单位产品排放量 kg/t	排放浓度 mg/m ³	单位产品排放量 kg/t	排放浓度 mg/m ³	单位产品排放量 kg/t
水泥窑及窑磨一体机 ^(*)	50	0.15	200	0.60	800	2.40	5	0.015
烘干机/烘干磨/煤磨/冷却机	50	0.30	—	—	—	—	—	—
破碎机/磨机/包装机/其他通风生产设备	50	0.024	—	—	—	—	—	—

注: *指烟气中 O₂ 含量 10% 状态下的排放浓度及单位产品排放量。

10.1.2 协同处置危险废物的水泥窑

《水泥工业大气污染物排放标准》中顺带提及的水泥窑协同处置危险废物时主要污染物的排放值:颗粒物、SO₂、NO_x 和氟化物的排放限值与使用常规原料、燃料时的排放限值相同;二噁英排放浓度不超过 0.1ngTEQ/m³;其他污染物执行《危险废物焚烧污染物控制标准》(GB18484-2001),如表 27 所示。

表 27 危险废物焚烧污染物控制标准

污染物	不同焚烧容量时的最高允许排放浓度限值 (mg/m ³)		
	≤300(kg/h)	300-2500(kg/h)	≥2500(kg/h)
烟气黑度	林格曼 I 级		
CO	100	80	80
HCl	100	70	60
Hg 及其化合物 (以 Hg 计)	0.1		
Cd 及其化合物 (以 Cd 计)	0.1		
As、Ni 及其化合物 (以 As+Ni 计)	1.0		

Pb 及其化合物（以 Pb 计）	1.0
Cr、Sn、Sb、Cu、Mn 及其化合物（以 Cr+Sn+Sb+Cu+Mn 计）	4.0

注：* 以上排放均是换算为含氧率为 11% 的条件下的数值。

10.2 国外水泥窑协同处置危险废物的标准与法规

10.2.1 美国

在美国，危险废物焚烧设施被划分为两种类型：

（1）主要以处理废物为目的而设计的焚烧设施—焚烧炉

危险废物焚烧炉主要用于分解和破坏危险废物，典型的危险废物焚烧炉包括回转窑式焚烧炉、流化床式焚烧炉、液体喷射式焚烧炉、固定床焚烧炉、气控式焚烧炉，电阻炉和等离子炉也归入焚烧炉。

（2）主要以能量回收和资源再利用为目的的焚烧设施—锅炉和工业窑炉（BIFs）

工业窑炉是指一种工业生产过程中利用热处理方式回收原料或能量的主要设备，包括以下几种：水泥窑、石灰窑、骨料烧结窑、磷酸盐窑、焦化炉、高炉、冶炼炉、氯化法二氧化钛氧化炉、甲烷转化炉、纸浆回收炉、废硫酸回收炉、氢卤酸炉、其它管理机构认定的窑炉。

美国危险废物焚烧设施应遵循的联邦法案主要有两个：资源保护和再生法案（RCRA）和清洁空气法案(CAA)。

RCRA 中涉及水泥窑协同处置危险废物的管理法规与标准包括：1991 年发布的 BIF（包括水泥窑）焚烧危险废物的 BIF 法规，编于联邦法规第 40 章第 266 节 H 小节（40 CFR Part 266 Subpart H），主要内容包括：法规的适用性、焚烧前的管理、焚烧设施的许可标准、焚烧设施的过渡期标准以及烟气中有机物、颗粒物、金属、HCl 和 Cl₂ 的排放控制标准等；1991 年发布的 BIF（包括水泥窑）焚烧危险废物的许可证管理办法，编于 40 CFR Part 270.22 和 270.66。

CAA 中涉及水泥窑协同处置危险废物的标准为有害大气污染物国家排放标准（NSHAPs），即最大可实现控制技术（MACT）法规。1999 年 9 月，在 CAA 的要求下，EPA 基于 MACT 发布了危险废物焚烧设施的 NSHAPs，编于 40 CFR

Part 63 Subpart EEE。该标准规定了二恶英和呋喃（PCDD/F）、氯化氢和氯气、6种金属元素（Hg、Pb、Cd、As、Be、Cr）、颗粒物、碳氢化合物以及有机物的焚毁去除率（DRE）等的限值。MACT 法规的发展分为两个阶段，1999 年 9 月发布的 MACT 法规为第一阶段法规，即制定了焚烧炉、水泥窑、轻骨料窑处置危险废物的 NSHAPs；2005 年 9 月发布了第二阶段法规，即制定工业锅炉、工业加热炉、盐酸生产炉处置危险废物的 NSHAPs，同时对第一阶段法规进行了修订，发布了焚烧炉、水泥窑、轻骨料窑处置危险废物的的有害大气污染物国家排放替代标准。

10.2.1.1 RCRA 管理下的 BIF 法规

10.2.1.1.1 烟气污染物排放控制要求

BIF 规范规定了四种污染物的排放控制要求，即有机物、氯化氢和氯气、金属、颗粒物。

(1) 有机物

BIF 法规控制有机物排放的指标有两个，即废物中主要有机有害成分（POHC）的焚毁去除率（DRE）和排放烟气中 CO 或碳氢化合物（HC）的浓度。

■ DRE

在美国，危险废物的焚烧设施需要进行试烧测试，检验对危险废物中 POHCs 的 DRE。POHCs 一般选择废物中含量高，难分解的有机成分，若试烧测试时焚烧设施对所选的 POHCs 的 DRE 满足要求，则表明该焚烧设施对废物中其他有机物的 DRE 也能达到要求。BIF 法规规定危险废物中的 POHCs 的 DRE 必须达到 99.99%或以上；一些含二恶英类的废物(如 F020, F021, F022, F023, F026, F027)中的 POHCs 的 DRE 必须达到 99.9999%。

作为 DRE 测试的 POHC 必须具有以下特性：

- (1) 该 POHC 应在协同处置的危险废物中具有代表性。
- (2) 该 POHC 应能从烟囱的排放物中与其它有机物很轻易地区别开来。
- (3) 该 POHC 在操作、检测和分析中都应有效存在。
- (4) 该 POHC 应能有效证明水泥窑对稳定化合物分解的能力，包括在高温

模式和氧化模式都失效的情况下对稳定化合物的分解能力。

基于以上标准，选择用来进行 DRE 测试的最常见的主要有机有害成分（POHC）一般为六氟化硫（SF₆）、氯苯、二氯苯、三氯苯、四氯苯和氯代甲烷等。

■ CO 或 HC

焚烧设施燃烧工况恶化将导致烟气中的不完全燃烧产物（PIC）浓度增大。BIF 法规通过限制烟气中的 CO 或 HC 浓度控制 PIC 的排放：CO 小于 100ppmv，HC 不限制；或 HC 小于 20ppmv，CO 排放浓度限值由试烧测试确定。以上浓度均指小时移动平均值，并转化为氧浓度 7% 的干烟气中浓度。

（2）颗粒物

BIF 法规规定的颗粒物排放限值为 180mg/m³，（20℃，1 标准大气压，氧浓度 7% 的干烟气）。

（3）金属元素

BIF 法规控制的金属元素分为两类：非致癌性金属（Sb、Ba、Pb、Hg、Ag、Tl）和致癌性金属（As、Cd、Cr、Be）。金属元素实行三级控制标准。

第一级标准（Tier I）是控制金属元素的投加速率，单位 g/h，40 CFR Part 266 附录 I 中规定了金属元素的投加速率限值，这些数值是根据如下方法和假设确定的：首先根据焚烧设施的烟气流量、烟囱高度、周边地形和土地利用情况确定每种金属元素可接收的排放速率，该排放速率即为投加速率，也即假设进料中的金属元素 100% 通过烟囱释放到大气中。设施所处的周边地形环境分为复杂地形和非复杂地形，复杂地形是指焚烧设施周边方圆 5 公里范围内有等于或高于烟囱物理高度的地形，反之为非复杂地形。

第二级标准（Tier II）是控制金属元素在烟囱出口处的排放速率，单位 g/h，金属元素的排放速率限值也在 40 CFR Part 266 附录 I 中进行了规定，因为 Tier I 在确定金属元素投加速率时假设进料中的金属元素 100% 排放，因此 Tier II 和 Tier I 在数值上完全相同。与 Tier I 不同的是，选择遵守 Tier II 标准的企业可通过排放测试确定进料中的金属元素有多少通过烟囱释放到大气中，从而根据 Tier

II 规定的排放速率限值反算出新的投加速率，该投加速率将会大于 Tier I 中规定的投加速率限值。

第三级标准（Tier III）是控制金属元素的排放对周边环境的影响，即不能影响周边环境的空气质量。Tier III 标准的执行方式与 Tire II 相同，也是规定金属元素的排放速率限值，但是与 Tire II 和 Tier I 不同的是，EPA 没有制定统一的排放速率限值，而是由企业通过测试金属元素的排放速率并利用相关的大气扩散模型预测不影响人体健康和周边环境的金属元素最大落地浓度，由此确定金属元素的排放限值。

由此可见，三个等级对应不同的监控项目和水平。第一级标准只要求监控金属的投加速率；第二级标准需要监控金属元素在底渣和产品中的分配率以及烟气污染控制设施对金属元素排放的控制能力，以保证烟气排放达标；第三级标准则需要通过大气扩散模型来计算金属元素的落地浓度是否会对当地居民和环境造成危害。从第一级标准到第三级标准需要监控项目和水平逐步增多和提高。

基于上述三个等级标准，EPA 还衍生了另一种控制标准，称之为调整第一级标准（Adjusted Tier I）。调整第一级标准同样是控制金属元素的投加速率，但投加速率限值与原 Tier I 标准规定的限值不同，该限值采用如下方法确定：采用与 Tier III 相似的方法，即由企业通过大气扩散模型和可接收的周边空气水平（见 40 CFR Part 266 附录 IV 和 V）反算出金属元素的最大排放速率限值，假设进料中的金属元素 100%通过烟囱释放到大气中，将该排放速率限值作为投加速率限值，即调整第一级标准。

（3）氯化氢和氯气

与金属元素的排放控制方法相同，BIF 法规对氯化氢和氯气的排放也采用三级控制标准，控制总氯投加速率的第一级标准和控制氯化氢和氯气排放速率的第二级标准限值见 40 CFR Part 266 附录 II 和 III。

10.2.1.1.2 运行要求

BIF 法规没有规定统一的运行要求，而是要求焚烧企业必须根据各自的焚烧设施特点制定专门的运行参数限值，以满足排放标准，这些参数包括废物和有害元素投加速率、燃烧温度、烟气温度、烟气中污染物浓度等。以协同处置危险废

物的水泥窑为例，需要制定限值的运行参数包括以下三类：

A 组参数是指需要连续监测并与废物进料系统自动联机互锁的参数，A 组参数的限值根据试烧测试结果确定，主要包括：窑内的温度范围、烟气最大流速、废物最大投加速率、CO 最大浓度、熟料产率范围、ESP 入口最大温度和最大电压等。

B 组参数是指无需连续监测和与废物进料系统联机互锁的参数，B 组参数的限值根据试烧测试结果确定，主要包括：窑内最小负压、常规原料投加速率范围，窑的最低转速、金属最大投加速率、通过 ESP 的最大烟气流速等。

C 组参数的限值根据所用设备和工艺的设计值和制造商推荐值确定，主要包括：液体危险废物投加装置最小雾化压力、危险废物燃烧器最大负荷比、窑内最小过量空气系数、总热值的最大输入速率等。

危险废物在 BIF 焚烧之前的运行要求与危险废物其他处置方式的运行要求一致，应遵守 RCRA 的统一规定：危险废物的产生应满足 40 CFR Part 262，危险废物的运输应满足 40 CFR Part 263，危险废物的贮存应满足 40 CFR Part 264 和 Part 265，危险废物经营许可程序应满足 40 CFR Part 270。

10.2.1.2 CAA 法规下的 MACT 法规

10.2.1.2.1 烟气污染物排放控制要求

MACT 法规规定了焚烧炉、水泥窑、轻骨料窑、工业锅炉、工业加热炉、盐酸生产炉处置危险废物的大气污染物排放限值。这些排放限值是通过性能最优的前 12% 或前 6% 的设施的性能测试数据进行统计分析后得到的，即通过性能最优的前 12% 的设施的排放平均值，或者通过性能最优的前 6% 的设施的排放最大值确定排放限值。例如，焚烧炉、水泥窑、轻骨料窑的排放限值是分别通过对 77 个焚烧炉、35 个水泥窑和 12 个轻质骨料窑的性能测试结果进行分析统计后得到的。

MACT 法规规定的水泥窑处置危险废物排放标准如下表所示，该标准为 2005 年 9 月发布的替代标准，2008 年 4 月经过最终修订，于 2008 年 10 月 14 日正式生效。

表 28 美国水泥窑处置危险废物大气污染物排放标准（2008 年 4 月修订）

	排放标准限值 ¹⁾	
	现有水泥窑	新建水泥窑
二恶英/呋喃	0.20TEQng/Nm ³ 或 0.40 TEQng/Nm ³ (一级除尘器进口温度不高于204℃)	0.20 或 0.40 (一级除尘器进口温度不高于204℃)
汞	废物浓度 3.0mg/kg; 或排放浓度不超过 0.120mg/Nm ³	废物浓度 1.9mg/kg; 或排放浓度不超过 0.120mg/Nm ³
半挥发性金属 (铅+镉)	排放浓度不超过 0.33mg/MJ-废物热值和 0.33mg/Nm ³	排放浓度不超过 0.027mg/MJ-废物热值和 0.18mg/Nm ³
低挥发性金属 (砷+铍+铬)	排放浓度不超过 0.009mg/MJ-废物热值和 0.056mg/Nm ³	排放浓度不超过 0.007mg/MJ-废物热值和 0.054mg/Nm ³
总氯元素 (氯化氢+氯气)	120 (以氯计, ppmv)	86 (以氯计, ppmv)
颗粒物(PM) 不透明度	63mg/Nm ³ 不超过 20% (不适用于袋体泄漏检测系统和颗粒物监测系统)	5.175mg/Nm ³ 不超过 20% (不适用于袋体泄漏检测系统和颗粒物监测系统)
一氧化碳 (CO) 或 碳氢化合物 (HC, 以丙烷计) ²⁾	有旁路: 旁路 CO 100ppmv 或 HC 10 ppmv; 无旁路系统: 主排气口 CO 100ppmv 或 HC 20 ppmv	有旁路: 旁路 CO 100ppmv 且 1996年4月19日后建设施(之前无水泥窑存在)主排气口 HC 50 ppmv; 或旁路 HC 10 ppmv 且 1996年4月19日后建设施(之前无水泥窑存在)主排气口 HC 50 ppmv; 无旁路系统: 主排气口 CO 100ppmv 且 1996年4月19日后建设施(之前无水泥窑存在)主排气口 HC 50 ppmv; 或主排气口 HC 20 ppmv;
有机污染物 ³⁾	每种主要有机有害污染物 (POHC) 的焚毁去除率应达到 99.99%。若燃烧危险废物含有 F020, F021, F022, F023, F026 或 F027 类废物(主要为含二恶英和呋喃类的废物) ⁴⁾ , 则每种主要有机有害污染物的破坏去除率应达到 99.9999%。	

标准说明:

1、以上排放均是基于 7%含氧量, 293 K, 压力 101.3KPa。CO 和 HC 指小时移动平均值; 不透明度指 6 分钟块平均值; 其他监测指标指性能测试的三次运行工况的平均值, 日常监测时可通过监测运行参数限值替代数值排放限值, 该运行参数限值通过综合性能测试建立, 即通过试验确定满足数值排放限值的运行参数限值, 不满足运行参数限值等同于不满足数值排放限值。

2、若选择满足 CO 排放标准, 则在检测焚毁去除率的性能测试中还需验证满足 HC 排放标准。

3、有机污染物的焚毁去除效率 (DRE):

$$DRE = \left[1 - \frac{W_{out}}{W_{in}} \right] * 100\%$$

Win—废物进料中一种主要的有机有害组分 (POHC) 质量流速;

Wout—进入大气前排放气体中同一种 POHC 的质量排放速度。

4、F020、F021、F022、F023、F026、F027 类危险废物主要指（见 40 CFR part261.31）：

F020—3, 4 氯酚生产过程和使用过程产生的废物，及 3, 4 氯酚生产杀虫剂等相关产品过程产生的废物

F021—五氯酚生产过程和使用过程产生的废物，及五氯苯酚生产相关产品过程产生的废物

F022—碱性环境下利用 4、5、6 氯苯进行生产时产生的废物

F023—3, 4 氯酚生产或使用过程采用的设备再用于生产其他材料时产生的废物

F026—碱性环境下利用 4、5、6 氯苯进行生产时采用的设备再用于生产其他材料时产生的废物

F027—丢弃的不再使用的含有 3, 4, 5 氯苯酚的物品，丢弃的不再使用的源自这些氯酚原料的产品

RCRA 法规控制的金属元素包括 12 种：Sb、As、Be、Cd、Cr、Pb、Hg、Ni、Se、Ag、Tl、Ba。1990 年 CAA 修正案控制的金属元素包括 11 种：Sb、As、Be、Cd、Cr、Pb、Hg、Ni、Se、Co、Mn，MACT 法规选择其中的 7 种（Sb、As、Be、Cd、Cr、Pb、Hg）进行控制，原因是这 7 种金属是 RCRA 和 CAA 都需要控制的金属元素，而且这 7 种金属的排放数据比较充分。

10.2.1.2.2 性能测试

性能测试的目的是验证危险废物焚烧设施能满足排放标准，并建立满足排放标准的运行参数限值，验证连续监测系统满足要求。因此，性能测试通常会设计在特定的“最差条件”下进行，也即在可能会造成排放烟气中污染物浓度最高的运行操作边界条件下进行排放测试，例如，在低温运行工况验证主要有机有害成分（POHC）的 DRE 满足标准，在高温运行工况验证金属元素的去除效率。

企业在性能测试前必须向主管部门提交性能测试方案，性能测试方案中必须要列明测试的次数、需要的时间、需要的废物用量等等。每次性能测试应包括三次重复试验，可能至少需要 8 小时才能完成，因此必须准备好适量的用料。由于所用废物中有害成分含量可能较少，或由于废物用量较少，性能测试有可能测不到准确的 DRE 数值。美国危险废物焚烧设备的许可证申请程序一直以来都非常复杂和耗时，有可能花几年时间才能拿到许可证。

性能测试程序包括：

（1）提交性能测试方案

进行性能测试前 6 个月内，许可证申请人应制定性能测试方案并提交到国家或地方环保局审批。性能测试方案应包括现行相关环保部认可的测试方式和步骤，并可获得所需的数据。

（2）性能测试方案的审核

性能测试方案必须通过环保相关管理部门或委托的专家组审核后，方可开展正式性能测试工作。

（3）开展性能测试

许可证申请人应按照审批通过的性能测试方案中的具体规定进行操作，并监控水泥窑运行、大气污染控制系统，以及水泥产品质量等，获得焚毁去除率、有害元素的最大投加速率、烟气排放数据以及水泥产品质量等相关数据。性能测试期限不应超过 720 小时（30 天）。

（4）性能测试数据的提交和证明

许可证申请人应在性能测试完成后 6 个月内向地方或国家环保管理部门提交一份性能测试报告、性能测试阶段收集的所有数据的复印件以及监测单位的资质证明等材料。

（5）性能测试结果评估

性能测试结果需通过环保相关管理部门或专家组进行论证，论证结论将为许可证的颁发提供依据。

10.2.1.3 BIF 法规和 MACT 法规之间的关系

BIF 法规是 EPA 在 1991 年基于 RCRA 发布的，但在执行过程中发现，该法规未能有效控制某些重要环境和健康风险，例如通过间接暴露途径造成的风险。MACT 法规是 EPA 在 1999 年基于 CAA 发布的，同时也综合了 RCRA 的要求，2005 年 9 月 EPA 又发布了 MACT 第二阶段标准和第一阶段替代标准，该标准比 BIF 法规更为严格。

因此，EPA 要求按 BIF 法规管理的 BIF 应对许可证进行修订以满足 MACT 法规。BIF 法规也不再适用于 2005 年 10 月 12 日以后获得 RCRA 许可证的新建 BIF 和已通过性能测试验证满足 MACT 法规要求的已建 BIF。

10.2.2 欧洲

10.2.2.1 欧盟有关水泥窑协同处置的指令

10.2.2.1.1 关于废物焚烧的指令（2000/76/EC）

2000/76/EC 指令整合和替代了原有的《新建生活垃圾焚烧厂预防大气污染指令》（Directives on the prevention of air pollution from new municipal waste incineration plants (89/369/EEC)）、《现有生活垃圾焚烧厂减少大气污染指令》（Directives on the prevention of air pollution from existing municipal waste incineration plants (89/429/EEC)）和《危险废物焚烧指令》（Directive on the incineration of hazardous waste (94/67/EC)），旨在预防或尽可能的限制废物焚烧或共烧（co-incineration）过程对环境的负面影响，尤其是向大气、土壤、地表水和地下水的污染排放，以及由此导致的人体健康风险。该指令规定了专用焚烧炉和工业窑炉（包括水泥窑）焚烧或共烧废物的技术和管理要求，包括废物的接收要求，设施运行条件、污染排放限值、监测要求等。

2000/76/EC 指令定义的共烧是指废物作为燃料提供热能或以被处置的目的进行热处理，要求焚烧还是共烧设施都必须获得许可证。该指令针对不同的焚烧或共烧设施类别制定了不同的排放限值，对于同一类设施，焚烧（或共烧）危险废物和非危险废物采用统一的排放限值，但在接收时的管理要求，焚烧（或共烧）的技术要求等方面有所不同。

由于水泥熟料煅烧的工艺特性，2000/76/EC 指令中对 SO₂ 和 TOC 的排放作了适当放宽，由原料条件所限造成的排放可以不计在内，总体上看，该指令制定的水泥窑协同处置废物时的排放限值比专用焚烧炉宽松，比不处置废物的水泥窑严格。另外，该指令还规定当共烧设施（包括水泥窑）热耗的 40%以上来自危险废物燃烧时，该共烧设施执行专用焚烧炉的排放标准。

2003 年 2 月 13 日欧盟的裁决法庭判定水泥窑使用替代燃料是资源回收，而替代燃料在焚烧炉中焚烧归为废物处置。这将有利于欧盟的下一个版本的焚烧指令继续提倡共烧。比较 2000/76/EC 指令以及各国对水泥窑污染物排放的要求，烧废物严格于不烧废物。欧盟的《废物填埋指令（1999/31/EC）》限制填埋可生物降解的废物，禁止液态和未处理的废物填埋。德国、荷兰和瑞士法规更加严格

地限制废物填埋处置，使这几个国家焚烧成为废物处置的主要手段。这一规定促进了水泥窑在内废物焚烧比例的提高。

在欧盟国家，水泥窑协同处置废物的排放标准（包括粉尘、氯化氢、氟化氢、氮氧化物、二氧化硫、12种重金属元素、总有机碳和PCDD/F's）必须要与2000/76/EC指令中关于废物焚烧的规定相符，该指令中明确了水泥窑协同处置是处理废物、销毁废物、以及能源再利用的可行手段。2000/76/EC指令对于二噁英和呋喃（PCDD/F's）的排放标准(0.1ng-TEQ/m³)比美国更严格（美国标准换算成273 K，压力101.3KPa，10%氧气的干烟气后为0.169ng-TEQ/m³）。但是在欧洲，不需要经过试烧来检验设备性能。

欧盟2000/76/EC中关于水泥窑协同处置废物的大气排放限值如表29所示，表中同时列出了欧盟国家水泥窑排放限值的范围和水泥窑长期排放的平均值。

表29 欧盟2000/76/EC水泥窑协同处置废物的大气排放限值

污染物	水泥窑	欧盟国家水泥窑排放限值的范围	欧盟国家水泥窑长期排放平均值
粉尘总量	30	50-150	20-200
TOC	10 ¹⁾		10-100
HCl	10	30	<25
HF	1	1-5	<5
NO _x	500 ²⁾ /800 ³⁾	500-1800	500-2000
SO ₂	50 ¹⁾	150-600	10-2500
CO	- ⁴⁾	—	500-2000
Cd+Tl	0.05	—	<0.1
Hg	0.05	—	<0.1
Sb+As+Pb+Cr+Co +Cu+Mn+Ni+V	0.5	—	<0.3
二噁英和呋喃（TEQ ng/m ³ ）	0.1	0.1	<0.1

标准说明：

- 1) 若SO₂和TOC并非由废物产生时，经管理机构可以批准可不受该排放限值限制。
- 2) 新建的工厂。
- 3) 已有的工厂。
- 4) CO的排放限制值可由管理当局设定。

排放限值单位为mg/m³（二噁英和呋喃以ng-TEQ/m³为单位）。测量结果应该在以下状态下进行标准化：温度273 K，压力101.3KPa，水泥窑为含10%氧气的干烟气。对于连续监测项目，取日平均值；对于非连续监测项目，取采样周期内（重金属：0.5-8小时；二噁英：6-8小时）的平均值

NO_x、CO、颗粒物、TOC、HCl、HF和SO₂执行连续监测，但对HCl、HF和SO₂可在确保排放不超标的条件下执行定期检测；重金属、二噁英和呋喃执行定期监测，新投产第1年每季度检测1次，以后每年测2次，若检测值不超过排

放极限的 50%，可以申请减少检测次数，重金属元素每 2 年检测 1 次，二噁英/呋喃每年检测 1 次；多环芳烃（PAH）等其他污染物的排放限值和监测要求可由各成员国自行制定。

10.2.2.1.2 关于工业排放的指令（2010/75/EU）

欧盟 2010 年 12 月发布了《关于工业排放的指令》（2010/75/EU）该指令是 2008/1/EC、2000/76/EC 等 7 个之前发布的不同行业指令的合并、统一和改进，以解决各行业指令之间的重复和混淆问题，减少不必要的管理负担，改进各行业指令中的不足之处。2010/75/EU 指令保留了原行业指令中的原则，同时加强了 BREF 报告的法律效力，澄清和扩大了指令的适用范围。该指令于 2011 年 1 月实施，2014 年 1 月前完成欧盟各成员国内法规的转化与实施，同时，2008/1/EC、2000/76/EC 等原行业指令将废止。

2010/75/EU 指令进一步澄清了共烧的定义是废物作为燃料提供热能或通过废物的氧化、热解、气化、等离子或其他热处理方式生成的产物的焚烧进行处置。该指令中规定的水泥窑协同处置（共烧）废物大气排放限值基本与 2000/76/EC 一致，仅将 NO_x 的排放限制调整为统一的 500mg/Nm³，不再分为新建设施和现有设施。

10.2.2.2 德国有关危险废物焚烧设施管理的法规

德国的废物焚烧应遵守“关于废物及类似可燃物焚烧设施的法令”，即“联邦污染防治法 V 第 17 条例”（17. BImSch V），该条例也适用于废物的协同处置设施，如水泥窑和电厂等。水泥协同处置废物时必须遵守 17. BImSch V 中关于排放极限的规定，而使用常规燃料的水泥窑的排放限值在“空气质量控制技术指南”（TA-Luft）中做了规定。2002 年 9 月，德国联邦政府对 17. BImSch V 的原有规定及排放标准作了一定修改和补充，确定焚烧废物的水泥窑排放标准如表 30 所示。

表 30 德国焚烧废物的水泥窑污染物排放标准

重金属	标准限值（mg/m ³ ）
粉尘总量*	20*
HCl	10*
HF	1*
NO _x	500*
SO ₂	50*
C	10*

Hg	0.03*
CO	50*
二噁英和呋喃	0.1 TEQ ng/m ³ **
Cd+Tl	0.05**
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V+Sn	0.5**
As+苯并(a)芘+Cd+Co+Cr	0.05**

注：*指日平均值；**指取样周期内平均值。

10.2.2.3 瑞士水泥窑协同处置废物的技术导则

该导则主要由 6 部分组成：

- (1) 引言：介绍了该导则制定的背景、意义和原则。
- (2) 导则应用领域：明确了瑞士适合水泥窑协同处置的废物种类，以及废物协同处置的运行操作要求。
- (3) 允许处置的废物要求：提出了允许在水泥厂协同处置的废物的名录；不在许可名录上的废物，若其中污染物含量满足规定的标准限值要求也可在水泥厂协同处置。
- (4) 熟料、水泥和烟气质量要求：熟料和水泥中的污染物含量必须满足规定的标准限值要求，否则必须减少废物处置量；水泥厂烟气排放必须满足大气污染控制条例（OAPC）要求；协同处置废物的水泥厂烟气排放除了应满足 OAPC 的要求外，Hg 的排放浓度还应满足 0.1mg/m³ 的限值要求，同时，协同处置废物不能造成烟气中污染物排放浓度的显著增加，并周期性地对有机物的排放进行监测。
- (5) 其它要求：规定了废物混合、暂存、运输及污染监测和质量控制方面以及特殊废物协同处置的相关要求。
- (6) 固体替代燃料（CSS）制备和使用的特殊要求：明确了可用于制备替代固体燃料的废物类别，制定了替代固体燃料中重点污染物质的年处置负荷，可用于制备替代固体燃料的废物中重金属的最大容许含量标准限值，并提出了替代固体燃料生产和使用的一般要求。

瑞士环境森林与园林管理局（SAEFL）会定期对该导则进行修订。以此为目的，SAEFL 任命了一个由各州代表和水泥工业界及废物处理工业界的代表组成的专家组，专家组至少每年一次定期召集聚会。当专家组发现在导则文件中存在

任何有必要改动的地方，专家组会向 SAEFL 提出建议。

该导则中的标准限值是由瑞士提出的一些指导参数，这些数据具有很强的地方性，尤其适用于瑞士及其周边国家，对亚洲或美洲等差别较大地区则只能作为参考。

10.2.3 日本

10.2.3.1 协同处置危险废物的烟气排放

由于日本没有专门的协同处置法规和标准，水泥窑协同处置危险废物时的排放烟气执行常规水泥生产的烟气排放标准，但烟气中的二噁英执行危险废物焚烧炉的烟气排放标准，即不超过 0.05ng-TEQ/m^3 。日本将利用垃圾焚烧飞灰和底渣替代 50% 以上水泥生产原料所生产的水泥定义为生态水泥，生产生态水泥时的排放烟气执行更为严格的危险废物焚烧炉烟气排放标准，见表 31。

表 31 日本危险废物焚烧炉烟气排放限值

项目	颗粒物	SO ₂	NO _x	HCl	Hg	二噁英	CO
单位	mg/m ³	ppmv	ppmv	ppmv	mg/m ³	ng-TEQ/m ³	ppmv
排放限值	10	10	50	10	0.05	0.05	100

10.2.3.2 协同处置危险废物的水泥产品

在日本，协同处置危险废物过程中生产的水泥产品执行普通的水泥产品质量国家标准，该标准规定了水泥产品的力学性能指标，并没有涉及水泥中污染物含量的限值及影响评价等。

针对生态水泥，日本制定了专门的生态水泥质量标准（JISR-5214），该标准同样仅规定了生态水泥的力学性能指标，没有涉及生态水泥中污染物含量的限值及影响评价等。但日本在《推进生活垃圾熔融固化物再生利用实施政策》中，规定熔融固化物要达到相关标准才可以进行再生利用，浸出液的标准值直接采用《排水基准》（相当于我国污水综合排放标准）中规定的标准值（见表 32）。生态水泥原则上也属于生活垃圾熔融固化物的再生利用，因此应满足该政策，即按照表 33 所示的《日本水泥中有害物质浸出实验方法》（日本的环境告示第 46 号）进行浸出实验，浸出液浓度满足表 32 中规定的限值。

另外，为降低水泥产品中水溶性六价铬引起的职业病风险，日本的水泥协会还规定了水泥产品中水溶性六价铬的含量限值（不大于 20ppm），但未对除水溶

性六价外的其他重金属含量进行限制。

表 32 污染物浸出限值

项目	汞	铅	镉	六价铬	砷
限值 (mg/L)	0.0005	0.01	0.01	0.05	0.01

表 33 日本水泥中有害物质浸出实验方法

项目	粒径和质量	浸取液	液固比	实验方式	实验时间	过滤方式
参数	<2mm, >50g	用HCl或 NaOH溶液 将纯水pH 调至5.8-6.3	10: 1	水平振动 (200次/ in, 振幅: 4-5cm	6h, 20℃ 左右	静置10-30min 后, 3000r/min 离心分离, 20min, 0.45 μ mMF过滤

10.3 本标准与主要国家、地区及国际组织同类标准的对比

本标准污染物排放限值与欧美等国进行比较的情况如附表 1 所示。由于各国情况不同，在排放指标的设置上略有出入，总体的污染排放的控制水平也有一定的差距。本标准中颗粒物的排放限值与欧盟一致；美国的标准中没有规定 SO₂、NO_x 和 HF 的限值，本标准中对 SO₂、NO_x 的排放限值与我国正在同时修订的《水泥窑大气污染物排放标准》(GB 4915-2012)征求意见稿保持一致，其中 SO₂ 接近欧盟标准，NO_x 严于欧盟标准，本标准中 HF、TOC、HCl、Hg 和二噁英的排放限值与欧盟标准相同，其中代表挥发性有机物的 TOC、HCl、Hg 均严于美国标准；其他重金属的排放浓度限值也基本与欧美相当。因此，本标准中的污染控制要求与发达国家同类标准要求的水平是相当的。

11 实施本标准的环境效益及经济技术分析

11.1 实施本标准的环境（减排）效益

水泥窑协同处置危险废物过程中的排放的多种污染物，包括二噁英、重金属和 VOC 以及常规污染物粉尘、NO_x、SO_x 等，其中有些污染物可以在大气中扩散，并最终沉积到水体、土壤和水泥产品中，这些污染物的排放会对人体健康和环境产生有害的影响。因此，执行制定标准的环境效益主要表现在控制水泥窑协同处置危险废物的污染物排放，并提高我国危险废物的处置容量，以及由此带来的环境效益和经济效益。

据我国第一次污染源普查公报显示，我国工业源中危险废物产生量 4573.69 万吨；综合利用量 1644.81 万吨，处置量 2192.76 万吨。然而，危险废物处置设施的设计处置能力为 1.13 万吨/日，危险废物实际年处置量 117.42 万吨；其中焚烧处置量 50.37 万吨，占全国危险废物处置量的 42.9%；填埋处置量 31.50 万吨，占 26.8%。

目前，我国水泥窑焚烧危险废物的排放标准是参照《危险废物焚烧污染控制标准》（GB 18484），其中大气污染物排放限值如表 34 所示。本标准拟定的排放限值大多比 GB 18484 降低 2-10 倍。例如颗粒物由 65mg/Nm³ 降低到 30mg/Nm³；HCl 从 60 降低到 10 mg/Nm³；二噁英从 0.5 降低到 0.1ngTEQ/Nm³，HF 从 5mg/Nm³ 降低到 1mg/Nm³ 等，详见表 34。

以 4000 吨/日规模水泥窑的为例，在协同处置危险废物的同时，每生产一吨熟料所产生的烟气排气量以 2300Nm³ 计算，总排气量为 920 万 Nm³/日。那么，实施本标准后烟气中颗粒物减排量为 69g/t 熟料，约 91.1t/a。依此类推，其他污染物的减排效果如表 34 所示。

表 34 本标准实施后污染物的减排效果分析（以 4000 吨/日规模水泥窑为例）

序号	污染物	现行危险废物焚烧炉标准限值 mg/Nm ³	本标准限值 mg/Nm ³	减排量 (t/a)
1	颗粒物	60	30	91.1
2	二氧化硫(SO ₂)	200	100	303.6
3	氮氧化物(以 NO ₂ 计)	500	320	546.48
4	氟化氢(HF)	5	1	12.1
5	氯化氢(HCl)	60	10	151.8
6	总有机碳(TOC)*	无标准	10	—
7	汞及其化合物(以 Hg 计)	0.1	0.05	0.15
8	铊、镉、铅、砷及其化合物(以 Tl+Cd+Pb+As 计)	≥2.0	1.0	≥3.0
9	铍、铬、锡、锑、铜、钴、锰、镍、钒及其化合物(以 Be+Cr+Sn+Sb+Cu+Co+Mn+Ni+V 计)	≥4.0	0.5	≥10.6
10	二噁英类	0.5 ng TEQ/Nm ³	0.1 ng TEQ/Nm ³	1.21g TEQ/a

因此，本标准的出台将较大幅度地提高水泥窑焚烧危险废物污染物的排放水平。这里大气污染物绝大部分首先影响大气环境质量，直接威胁人民身体健康安全，并可能会进入土壤，污染土壤和地下水，对饮用水水质造成威胁，降低土壤利用价值。另外，利用危险废物作为替代燃料和原料生产水泥可达到减少温室气

体 CO₂ 排放的作用。

11.2 实施本标准的技术经济分析

(1) 水泥窑协同处置技术的投资估算

目前,我国危险废物集中焚烧处置的费用一般为 5000-6000 元/吨,而水泥窑的实际处置费用大概为 2000-4000 元/吨,可大大降低处置费用,减少产废单位的压力。假设水泥窑协同处置在我国发展的规模按 100 万 t/a 计算,与建设专业危险废物焚烧炉相比,水泥窑协同处置危险废物可减小处置费用 20-30 亿元。但是,水泥企业在从事处置危险废物业务时也需要对水泥窑进行适当的、一定的技术改造,需要增加部分投资。以北京水泥厂为例,按照 8 万 t/a 的处置规模估算,建设一条水泥窑协同处置危险废物示范工程项目的投资约 5200 万元,如表 35。

表 35 水泥窑协同处置危险废物生产线的技改投资估算

	投资项目	资金需求(万元)	备注
技术 改造	危险废物运输能力	300	资质、运输车辆、人员
	贮存设施	1000	贮存库、容器
	预处理设施	2000	混合、破碎、输送设备
	输送和投加设施	1000	
	分析实验室	450	分析仪器、人员
	污染控制设施	400	布袋除尘更换、在线监测设备
	技术培训与人力配套	50	
	总计	5200	

每建设一整套符合标准的专业集中焚烧设施一般至少需要 1.0 亿元资金的投入,相比较而言,采用水泥窑协同处置技术进行危险废物的无害化处置可节省大量的固定资本的投入。

(2) 危险废物处置能力的提升

2008 年我国新型干法生产线数量由 2005 年的 615 条增长到 934 条。截止 2008 年底,全国新型干法熟料产能 7.6 亿吨,新型干法水泥比例达 61%。其中 2000-3000t/d 规模的水泥生产线数量最大,为 282 条,而 4000-5000t/d 的大型生产线占熟料总产能的比率最大,为 38.35% (见表 35)。由此可见,我国可用于发展水泥窑协同处置危险废物业务的水泥窑潜力非常大。

表 35 2008 年我国新型干法生产线

规模 (t/d)	≤1000	1001~2000	2001~3000	3001~4000	4001~5000	>5000	合计
生产线数(条)	193	210	282	38	189	22	934
熟料能力(万 t)	5555.10	9910.61	22291.89	4447.19	29228.39	4763.27	76196.45
占熟料总产能比 (%)	7.29	13.01	29.26	5.84	38.35	6.25	100.00

以北京水泥厂为例，2002 年建成了国内第一套利用水泥回转窑处理工业废物和危险废物的工艺系统，熟料生产能力 3000 t/d。目前可处理的危险废物种类包括废酸碱、废化学试剂、废有机溶剂、废矿物油、乳化液、医药废物、涂料染料废物、含重金属废物（不含汞）、有机树脂类废物、精（蒸）馏残渣、焚烧处理残渣等，设计处理能力达 8 万 t/a。由此推断，假如在我国大力推广和发展水泥窑协同处置危险废物技术，每条生产线按 5 万 t/a 的处置规模计算，平均每省建设 1 条水泥生产线用于协同处置危险废物，则可扩大危险废物处置容量为 150-300 万 t/a。这将大大降低我国危险废物处置压力，并对我国大力发展节能减排做出巨大的贡献。

(3) 可达性分析

由于新型干法水泥生产技术的旋转窑具有高温、停留时间长、强碱性气氛等工艺特点，危险废物在水泥窑中能达到较好的无害化处置效果。协同处置企业在配备预处理和高效的布袋除尘等配套设施的前提下，本标准及附录的相关规定进行科学操作和管理，控制废物中有害元素的投加速率，绝大多数协同处置危险废物的水泥窑可以达到本标准的相关要求。

11.3 对实施本标准的建议

(1) 提高水泥窑协同处置危险废物的准入门槛

本标准对于申请从事协同处置危险废物的水泥企业规定了一些必要条件，例如水泥窑窑型、规模和污染控制配套设施等，提高了从事该行业的准入门槛，避免大多数水泥企业盲目上马，一哄而上的局面。有利于对从事水泥窑协同处置企业的规范管理和控制污染。

(2) 加强水泥窑协同处置危险废物的监管力度

本标准规定了较为严格的烟气排放限值，包括在线监测和定期监督性监测。从事危险废物协同处置的水泥窑的废物处置信息和排放数据应详细记录在案，保持完好，环保部门应加强监管力度。对于超标排放的水泥窑应根据实际

况及时暂停或减少危险废物的处置，防止污染事故的发生。

（3）大力开发水泥窑协同处置危险废物的潜力，合理利用资源

水泥窑与专业危险废物焚烧炉相比较而言，规模和处置容量大，且在无害化处置危险废物的同时能作为水泥生产的替代燃料或替代原料，节省了成本，实现了废物的资源化利用。大力推广水泥窑协同处置危险废物技术和设施的建设，是我国危险废物处置能力的重要补充。然而，我国水泥窑协同处置危险废物技术还处于初级阶段，还不够成熟，应加强科研开发的力度，在保证水泥质量和减小环境影响的前提下，更加深入地挖掘水泥窑协同处置危险废物的潜力。

附表 1：本标准与美国和欧盟水泥窑焚烧危险废物标准的比较⁽¹⁾

本标准		美国标准			欧盟 2000/76/EC 指令	
排放指标	限值	排放指标	限值		排放指标	限值
			现有设施	新建设施		
颗粒物	30	颗粒物	54	4.44	颗粒物	30
SO ₂	200（现有设施） 100（新建设施） 50（重点地区设施）	—	—	—	SO ₂	50 ⁽³⁾
NO _x	800（现有设施） 450（现有设施 2015 年 1 月 1 日后） 320（新建设施及重点 地区设施）	—	—	—	NO _x	800（现有设施） 500（新建设施）
氟化物	1	—	—	—	HF	1
TOC ⁽²⁾	10	CO 或 HC	CO 不大于 98.2， 且试烧时 HC 不大 于 30.9； 或 HC 不大于 30.9	CO 不大于 98.2，且 HC 不 大于 77.2； 或 HC 不大于 30.9	TOC	10 ⁽³⁾
—	—				—	—
HCl	10	总氯	149.4	107.1	HCl	10
Hg	0.05	Hg	0.10	0.10	Hg	0.05
Tl+Cd + Pb+As	1.0	Pb+Cd	0.28	0.15	Tl+Cd	0.05
Be+Cr+Sn+Sb+Cu+Co+ Mn+Ni+V	0.5	As+Be+Cr	0.05	0.05	Sb+As+Pb+Cr+Co +Cu+Mn+Ni+V	0.5

二噁英 (ngTEQ/Nm ³)	0.1	二噁英 (ngTEQ/Nm ³)	0.17 0.34 (除尘器入口 温度不高于 204℃ 时)	0.17	二噁英 (ngTEQ/Nm ³)	0.1
氨	8					

注：（1）单位均为 mg/m³，另有说明的除外；烟气浓度均换算成标准状态下，O₂ 含量 10%。

（2）指水泥窑协同处置危险废物所增加的 TOC 的排放浓度限值。

（3）若 SO₂ 和 TOC 并非由废物产生时，经管理机构可以批准可不受该排放限值限制。

附表 2：欧盟国家水泥窑焚烧废物的大气污染物排放标准的比较

国家名称	颗粒物	NOx	SO ₂	HF	HCl	TOC	Hg	Cd+Tl	Sb+As+Pb+Cr+ Cu+Mn+Ni+V	二噁英
欧盟 2000/76/EC 指令	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
比利时	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
德国	20	500/500	50	1	10	10	0.03	0.05	0.5	0.1
希腊	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
荷兰	15	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
奥地利	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
瑞士	50	800	500	—	30	10	0.1	0.1	—	0.1
土耳其	120	1500/1300	400	5	30	10	0.1	0.1	1.0	0.1
捷克	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
丹麦	30	1200/800	500	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
西班牙	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
法国	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
意大利	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
英国	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
瑞典	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
匈牙利	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
罗马尼亚	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
波兰	30	800/500	50	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1
挪威	30	800/-	500	1	10	10	0.05	0.05	0.5	0.1

注：单位均为 mg/m³，二噁英为 ng-TEQ/Nm³；烟气浓度均换算成标准状态下，O₂ 含量 10%。

附表 3-1: 美国水泥窑协同处置危险废物排放数据统计表——总氯 单位: ppmv

置信区间 X%	排放浓度										排放标准限值	
	1999 年 前数据	1999 年 后数据	布袋除尘		静电除尘		新型干法		湿法长窑			
			1999 年 前	1999 年 后	1999 年 标准	2008 年 标准						
平均值	38.2	18.5	27.7	—	45.08	18.48	15.75	—	38.6	18.48	130	120
99%	225.84	6.5	161.09	—	222.58	6.5	32.3	—	91.45	6.5	—	—
95%	118.68	11.2	83.34	—	126.52	11.2	7.4	—	56.22	11.2	—	—
90%	84.22	16.6	58.65	—	93.62	16.6	4.6	—	43.38	16.6	—	—
85%	66.82	22.1	46.27	—	76.40	22.1	18.8	—	36.42	22.1	—	—
80%	55.60	36.1	38.32	—	65.01	36.1	—	—	31.69	36.1	—	—

附表 3-2: 美国水泥窑协同处置危险废物排放数据统计表——Hg 单位: $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$

置信区间 X%	排放浓度										排放标准限值	
	1999 年前数据	1999 年后数据	布袋除尘		静电除尘		新型干法		湿法长窑		1999 年标准	2008 年标准
			1999 年前	1999 年后								
平均值	38.02	10.32	171.5	—	33.1	10.3	98.05	—	30.31	11.41	120	120
99%	413.06	15.19	351.91	—	429.09	15.2	298.7	—	183.57	15.2	—	—
95%	168.88	17.25	158.08	—	170.01	17.2	43.3	—	96.47	17.2	—	—
90%	104.83	1.90	103.18	—	103.78	1.9	4.4	—	68.46	1.9	—	—
85%	75.99	6.84	77.37	—	74.39	6.8	91.7	—	54.32	6.8	—	—
80%	58.85	4.84	61.55	—	57.09	15.9	52.1	—	45.19	15.9	—	—
75%	47.26	15.86	50.58	—	45.49	4.8	—	—	38.60	—	—	—

附表 3-3: 美国水泥窑协同处置危险废物排放数据统计表——颗粒物 单位: mg/Nm³

置信区间 X%	排放浓度										排放标准	
	1999 年前数据	1999 年后数据	布袋除尘		静电除尘		新型干法		湿法长窑		1999 年标准	2008 年标准
			1999 年前	1999 年后								
平均值	49.3	35.75	25.5	—	51.50	38.14	51.18	—	47.26	38.14	0.15kg/ 吨生料, 不透光率 小于 20%	64
99%	321.41	1.98	232.51	—	203.19	1.98	58.28	—	336.40	1.98		—
95%	166.28	23.81	104.44	—	126.90	35.78	51.87	—	166.03	35.78		—
90%	117.02	35.78	68.17	—	98.73	37.99	55.68	—	113.95	37.99		—
85%	92.32	37.99	51.12	—	83.35	46.84	38.90	—	88.39	46.84	—	—
80%	76.47	46.84	40.67	—	72.86	68.12	—	—	72.23	68.12	—	—
75%	65.06	68.12	33.42	—	64.92	—	—	—	60.75	—	—	—
70%	56.27	—	28.02	—	58.52	—	—	—	52.00	—	—	—

附表 3-4: 美国水泥窑协同处置危险废物排放数据统计表——低挥发性金属（砷+铍+铬） 单位: $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$

置信区间 X%	排放浓度										排放标准限值	
	1999 年 前数据	1999 年 后数据	布袋除尘		静电除尘		新型干法		湿法长窑			
			1999 年 前	1999 年 后	1999 年 标准	2008 年 标准						
平均值	31.8	33.6	34.7	—	31.1	33.6	5.65	—	34.19	33.6	56	56
99%	279.13	17.1	308.22	—	290.10	17.1	2.3	—	225.30	17.1	—	—
95%	108.87	121.3	112.90	—	114.94	121.3	1.2	—	93.57	121.3	—	—
90%	65.91	7.0	66.10	—	70.16	7.0	8.3	—	58.57	7.0	—	—
85%	46.97	13.7	46.06	—	50.29	13.7	12.0	—	42.70	13.7	—	—
80%	35.89	9.0	34.57	—	38.60	9.0	4.5	—	33.21	9.0	—	—
75%	28.49	—	27.02	—	30.76	—	—	—	26.77	—	—	—
70%	23.15	—	21.66	—	25.08	—	—	—	22.06	—	—	—

附表 3-5: 美国水泥窑协同处置危险废物排放数据统计表——半挥发性金属(铅+镉) 单位: $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$

置信区间 X%	排放浓度										排放标准限值	
	1999 年 前数据	1999 年 后数据	布袋除尘		静电除尘		新型干法		湿法长窑		1999 年 标准	2008 年 标准
			1999 年 前	1999 年 后								
平均值	407.0	49.9	279.7	—	496.93	49.9	15.52	—	444.3	49.9	240	330
99%	9791.94	1.7	5293.14	—	7619.33	1.7	6	—	9796.67	1.7	—	—
95%	2662.13	3.1	1289.34	—	2621.20	3.1	2	—	2791.79	3.1	—	—
90%	1329.50	8.0	607.29	—	1484.07	8.0	17	—	1429.69	8.0	—	—
85%	832.22	45.6	365.42	—	1011.05	45.6	32	—	910.22	45.6	—	—
80%	573.52	60.7	244.04	—	745.25	60.7	20	—	635.77	60.7	—	—
75%	416.70	180.1	172.60	—	573.66	180.1	—	—	467.30	180.1	—	—
70%	312.79	—	126.46	—	453.52	—	—	—	354.42	—	—	—

附表 3-6: 美国水泥窑协同处置危险废物排放数据统计表——二噁英 单位: ngTEQ/Nm³

置信区间 X%	排放浓度										排放标准限值	
	1999 年前 数据	1999 年 后数据	布袋除尘		静电除尘		新型干法		湿法长窑			
			1999 年 前	1999 年 后	1999 年 标准	2008 年 标准						
平均值	1.04	0.68	0.21	—	1.17	0.68	0.25	—	1.08	0.68	0.2	0.2
99%	17.170	2.6946	3.20	—	20.02	0.0060	1.1693	—	15.91	0.0060	—	—
95%	5.292	0.6774	1.14	—	6.27	0.0110	0.0070	—	5.22	0.0110	—	—
90%	2.826	0.0202	0.65	—	3.38	0.0202	0.0116	—	2.88	0.0202	—	—
85%	1.851	0.0060	0.45	—	2.22	0.6774	0.0165	—	1.93	0.6774	—	—
80%	1.322	0.0110	0.34	—	1.60	2.6946	0.0211	—	1.40	2.6946	—	—
75%	0.991	—	0.26	—	1.20	—	—	—	1.07	—	—	—
70%	0.764	—	0.21	—	0.93	—	—	—	0.84	—	—	—
60%	0.479	—	0.14	—	0.59	—	—	—	0.54	—	—	—
50%	0.309	—	0.09	—	0.38	—	—	—	0.35	—	—	—
40%	0.200	—	0.06	—	0.25	—	—	—	0.23	—	—	—