

附件 5

《PM_{2.5}排放量核算技术规范（火电厂、水泥工业企业）》 （征求意见稿）

编制说明

项目名称： PM_{2.5} 排放量核算技术规范（火电厂、水泥工业企业）

项目统一编号：

起草单位：环境保护部环境规划院、清华大学

主要起草人：雷宇、燕丽、贺晋瑜、刘乃瑞

环境保护部环境规划院项目管理人：杨金田

环保部科技标准司项目管理人：XXX

目 录

1 任务来源	1
2 技术规范制定的意义	1
3 编制原则	1
4 国内外 PM _{2.5} 排放计算方法研究概况	2
4.1 美国	2
4.2 欧洲	2
4.3 中国	3
5 我国火电、水泥行业颗粒物污染防治状况	4
5.1 火电行业	4
5.2 水泥行业	6
6 主要技术内容及说明	9
6.1 火电厂 PM _{2.5} 排放量核算方法	9
6.2 水泥工业企业 PM _{2.5} 排放量核算方法	14
7 技术规范实施的建议	18

《PM_{2.5} 排放量核算技术规范（火电厂、水泥工业企业）》编制说明

1 任务来源

近年来，我国以 PM_{2.5} 为特征污染物的区域性大气污染问题日益突出，亟需加强 PM_{2.5} 排放控制。火电、水泥等工业行业是一次 PM_{2.5} 排放的重要来源，对全国 PM_{2.5} 排放的贡献超过 10%；国务院印发的《大气污染防治行动计划》已将火电、水泥等工业行业作为产业结构调整和加大综合治理力度的重点。但目前我国火电、水泥等主要工业行业 PM_{2.5} 排放基数不清、特征不明，且缺少统一、规范的 PM_{2.5} 排放量计算和减排效果评估方法。为落实《大气污染防治行动计划》，推进火电、水泥等主要工业行业 PM_{2.5} 排放的控制，环境保护部科技标准司组织环境保护部环境规划院和清华大学编制了该技术规范。

2 技术规范制定的意义

火电、水泥行业是我国大气污染控制的焦点，开展火电厂和水泥工业企业 PM_{2.5} 排放量的计算和治理工程减排效果的评估，对推动 PM_{2.5} 排放削减具有重要的现实意义。

1) 为企业核算 PM_{2.5} 排放量提供技术支持

技术规范针对单个排放源制定了简单、易行的 PM_{2.5} 核算方法，可有效指导火电厂和水泥工业企业开展 PM_{2.5} 排放量的核算。

2) 提高 PM_{2.5} 治理技术水平

技术规范对颗粒物治理技术进行了详细划分，可实现对不同治理工程 PM_{2.5} 减排效果的定量评估，鼓励企业采用先进的颗粒物治理技术，有助于提高火电厂和水泥工业企业的 PM_{2.5} 治理技术水平。

3 编制原则

1) 实用性原则

技术规范的编制充分考虑了核算方法的简易化和实用性，通过对国内外相关研究的综合分析，提出了可行的计算参数；并明确了核算主体、工作流程和数据质量要求等内容，保证了技术规范的可操作性。

2) 完整性原则

基于我国火电行业 and 水泥行业生产工艺分布状况，建立了包含燃煤机组、燃油燃气机组的火电厂 PM_{2.5} 排放量计算方法，和包含新型干法、湿法等工艺的回转窑或立窑熟料生产线，水泥生产线，以及水泥粉磨站的水泥工业企业排放量计算方法。

4 国内外 PM_{2.5} 排放计算方法研究概况

排放因子法是环境管理中核算污染物排放量的重要方法。为实现环境管理的目的，欧美等国家普遍开展排放因子数据库的编制工作，通过制定与源排放特征相对应的排放因子计算 PM_{2.5} 排放量。

4.1 美国

美国 1990 年的清洁空气法修正案（Clean Air Act Amendments, CAAA）以及紧急计划和公众知情权法（Emergency Planning And Community Right-To-Know Act, EPCRA）就提出了对常规污染物的排放因子的需求（Eastern Research Group, Inc., 1997）。此后美国环保署进行了大量工作，对包括火电厂、水泥窑等各类排放源的排放因子测试方法进行了规范，组织了大量测量，并结合历史的排放源测试结果，对各类排放源的特征进行了梳理和归纳，在此基础上编制了大气污染物排放因子 AP-42（U.S. Environmental Protection Agency, 1996），此后，AP-42 每年进行完善和更新。为全面了解排放源特征，预测控制措施的减排效果提供了坚实的基础。

被广泛应用的美国 AP-42 数据库根据锅炉类型、煤炭质量、排放控制技术提供了火电锅炉不同粒径颗粒物的产生系数，及不同控制措施对应的排放因子。在水泥排放因子方面，AP-42 分工序，并依据窑型和控制措施给出了颗粒物的产生系数。

表 1 美国 AP-42 中煤粉炉颗粒物排放因子

单位：lb/ton

颗粒物	产生系数	排放因子			
		机械式除尘	湿式除尘	静电除尘	袋式除尘
PM ₁₀	2.3A	0.58A	0.42A	0.054A	0.02A
PM _{2.5}	0.6A	0.06A	0.3A	0.024A	0.01A
PM _{1.00}	0.2A	0.02A	0.18A	0.01A	0.006A
TSP	10A	2A	0.6A	0.08A	0.02A

4.2 欧洲

于 1979 年签署了《长距离越境空气污染公约》（LRTAP）的草案，促成了“欧洲监测及评估长距离跨国境大气污染传送合作计划”（EMEP）；该计划旨在为 LRTAP 约束下的各国政府及其相关机构提供有意义的科学信息，以帮助进一步减排空气污染物，改善空气质量。在此计划下，欧洲自 1980 年开展相关研究，设计了一套排放量计算方法和框架，为欧洲各国大气污染防治政策的制定提供了依据。欧盟成立后颁布了大型燃烧设备控制指令、国家排放上限指令等一系列法令控制大气污染物排放，为预测和评估各项法令实施后的污染物减排

效果，欧盟也普遍使用污染物排放因子法进行计算。

目前欧盟使用的火电机组的 $PM_{2.5}$ 排放因子与美国 AP-42 基本相同；基于物料衡算法，通过颗粒物粒径分布状况和控制技术的分级除尘效率，实现 $PM_{2.5}$ 排放量的计算。欧洲 RAINS 模型中对除尘技术的划分较 AP-42 更为详细，这与除尘技术的实际分布状况有关。欧洲环境署颁布的 EMEP/EEA 空气污染物排放清单指南中，分窑型推荐了采用电除尘的水泥生产线的颗粒物排放系数及 $PM_{2.5}$ 的质量百分比。

表 2 欧洲 RAINS 模型中使用的粒径分布

锅炉类型	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5-10}$	PM_{10}	$PM_{>10}$	TSP
煤粉炉	6 %	17 %	23 %	77 %	100 %
循环流化床	5%	21%	26%	74%	100%

表 3 欧洲 RAINS 模型中使用的控制技术的分级除尘效率

控制技术	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5-10}$	$PM_{>10}$
机械除尘	30%	70%	90%
湿法除尘	96%	99%	99.9%
电除尘（1 电场）	93%	95%	97%
电除尘（2 电场）	96%	99%	99.9%
电除尘（3 电场及以上）	99%	99.9%	99.95%
湿式电除尘	99%	99.9%	99.95%
袋式除尘	99%	99.9%	99.98%

4.3 中国

排放因子法也是我国环境管理中经常使用的污染物核算方法，在 1996 年我国就出版了《工业污染产生与排放系数手册》。2007 年开展污染源普查时，也是通过排放系数法实现污染源排放量的计算，在《第一次污染源普查工业产排污系数手册》中依据火电机组类型、燃料类型、机组规模和除尘设施类型制定了详细的火电行业烟尘排放系数。目前，我国的环境统计中烟尘的计算也主要依赖污染源普查形成的排放因子数据库。

我国目前使用的工业烟尘排放因子数据库存在以下问题：（1）静电除尘器的除尘效率采用了统一数值，不能反映电场数对除尘效率的影响；（2）由于火电行业污染控制要求的不断提高，近年来我国火电机组的烟尘控制技术进步明显，现有的烟尘排放系数时效性不足，缺少与二次除尘等先进控制技术相对应的排放系数；（3）仅针对烟尘的计算，缺少 $PM_{2.5}$ 的排放系数。

为加强对主要工业源的监管，开展 $PM_{2.5}$ 排放的统计，有效评估治理工程的颗粒物减排效果，我国亟需建立主要工业源 $PM_{2.5}$ 排放量核算的排放因子数据库和技术规范。

5 我国火电、水泥行业颗粒物污染防治状况

5.1 火电行业

5.1.1 火电行业概况

火电是我国的主力电源，历年来我国火力发电装机容量一直呈上升趋势，以燃煤为主的火力发电机组在我国电力工业中占主导地位。截止 2012 年底，全国火电装机容量占发电总装机容量的 73%。燃煤机组是我国火力发电的主体，2012 年底我国煤电总装机达 758110MW，占火力发电装机容量 97.6%，燃油、燃气机组占火电装机容量的不足 3%，其烟尘排放量在整个火电部门中不足 1%。依据火电行业机组构成，本技术规范将燃煤机组作为火电行业 PM_{2.5} 排放量核算的重点。

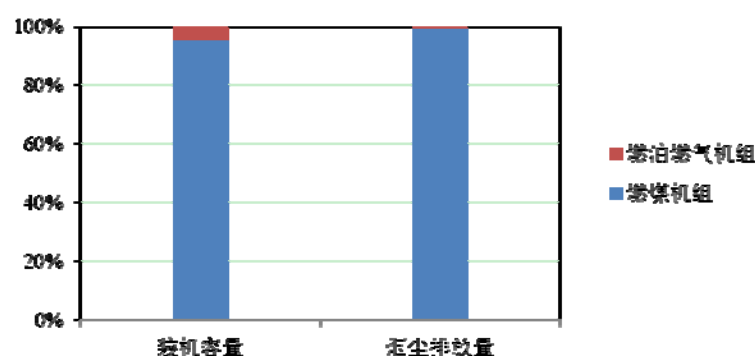


图 1 2012 年中国火电行业机组构成

5.1.2 火电行业颗粒物排放现状

2006-2010 年火电行业烟尘排放量下降了 59.1%，发电技术水平的提高和排放标准的提升是促进排放量大幅降低的两大关键因素。“十一五”期间，我国共关停小火电机组 7683 万千瓦，发电煤耗由 2006 年 343gce/kwh 下降到 2010 年的 312gce/kwh。同时，《火电厂大气污染物排放标准》（GB13223-2003）的实施，大幅提升了烟尘排放标准，大批火电企业在 2006-2009 年进行了除尘设施改造，促使了火电行业烟尘排放量的大幅下降。2010 年-2012 年，火电行业烟尘排放量基本保持了稳定。

我国火电行业烟尘排放量依然巨大，2012 年我国火电行业烟尘排放占到全国工业烟尘排放量的 15%左右；火电机组的燃烧过程中还排放了大量的细颗粒物，研究表明，我国火力发电部门 PM_{2.5} 排放对 PM_{2.5} 总排放的贡献超过 10%。火电厂是我国大气污染控制的重点，开展火电厂 PM_{2.5} 排放量的计算，对推进我国 PM_{2.5} 排放控制，大气污染防治的综合决策具有重要意义。

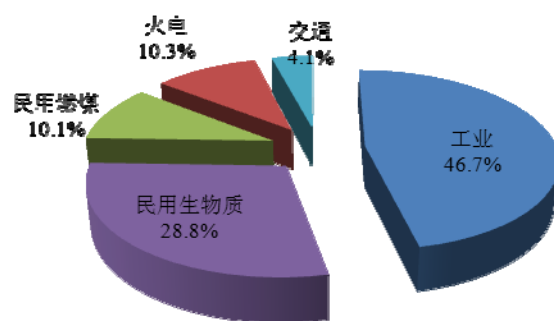


图 2 中国 PM_{2.5} 排放部门分担率

5.1.3 电厂锅炉技术状况

我国的电力工业燃煤锅炉以煤粉炉为主。上世纪 90 年代至本世纪初，我国燃煤电厂锅炉中固态排渣煤粉炉所占比例约为 92%，其他 8%为层燃炉。随着大量大容量高参数机组的建成投产以及淘汰落后产能的进程，容量较低的层燃炉基本得到了淘汰。近几年来，循环流化床锅炉逐步在我国电厂中投入运行。基于我国电站燃煤锅炉的分布状况，本技术规范中与锅炉类型有关的参数，均按煤粉炉和循环流化床两类给出。

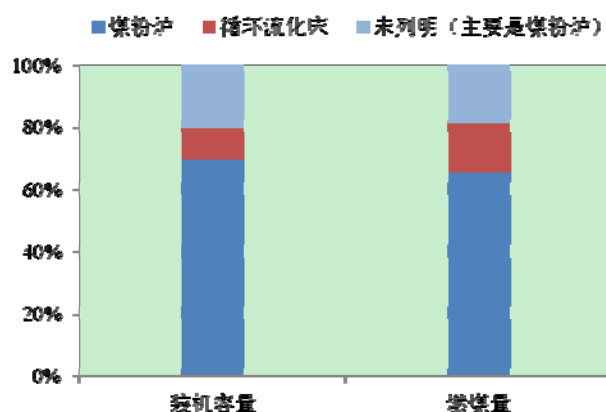


图 3 我国燃煤发电锅炉炉型分布

5.1.4 电厂锅炉颗粒物治理状况

随着标准的不断加严，我国火电厂的除尘技术不断优化，由上世纪 80 年代的多管、水膜除尘，发展为电除尘为主。目前我国火电厂颗粒物排放控制技术应用状况：（1）以静电除尘器为主，80%以上的火电机组安装高效静电除尘器；（2）三电场、四电场、五电场静电除尘器均有使用；（3）使用三电场及以上电除尘器的火电机组基本在下游安装了湿法烟气脱硫装置；（4）个别采用五电场的火电机组在湿法脱硫之后，加装了二次湿法除尘装置（5）各种可应用于火电机组的袋式除尘器、电袋复合除尘器等高效除尘器相继涌现，并有一定程度的实际运行案例。

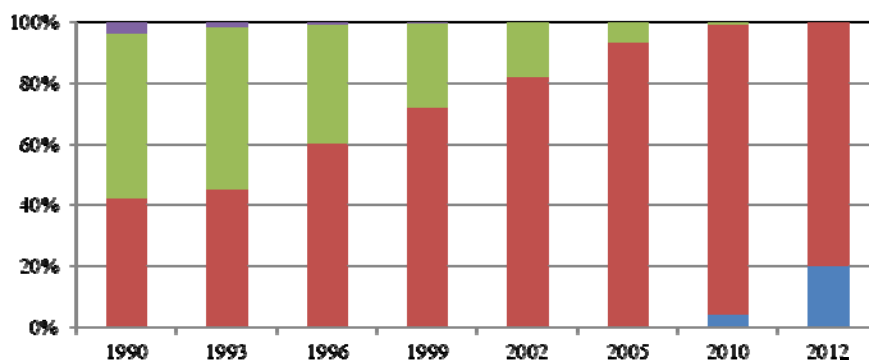


图4 中国火电行业除尘技术进展

目前，火电厂与颗粒物去除有关的控制技术组合包括：

- 静电除尘（三电场及以下）
- 静电除尘（三电场）+湿式脱硫
- 静电除尘（四电场）+湿法脱硫
- 静电除尘（五电场）+湿法脱硫
- 静电除尘（五电场）+湿法脱硫+二次除尘
- 袋式（电袋式）除尘

5.2 水泥行业

5.2.1 水泥行业概况

水泥工业是我国国民经济的重要基础行业，也是我国高耗能、高污染的行业之一。随着中国经济的高速稳定发展，中国水泥工业经过“黄金十年”的高速发展，新型干法生产线爆发式的建设和扩张，使得水泥产能和产量迅猛增长，2012年全国水泥总产量已达为22.10亿吨，超过全球水泥总产量的60%。

随着水泥行业的快速结构调整，新型干法水泥生产线的数量、规模和比重都在急速提高。截至2012年底，我国已经拥有新型干法水泥生产线达1627条，相较于2001年的166条增长了近10倍。新型干法设计水泥熟料产能已达15.86亿吨，相较于2001年的累计产能0.84亿吨增长了近19倍，年均增速保持在27%。新型干法水泥产量达20.37亿吨，占比超过水泥总产量的92%。

水泥行业结构的调整和新型干法生产线的建设伴随着水泥工业产业集中度也的快速提高，从客观上促进了水泥工业劳动生产率和节能水平的提高。目前我国新型干法水泥单线规模已达到日产熟料12000吨以上，每公斤熟料热耗降至700千卡（2926千焦），吨水泥综合电耗不超过90千瓦时，粉尘排放率0.01%以下，全员劳动生产率达到1~1.5万吨/人·年。

我国2001-2012年的水泥产量及新型干法水泥情况见表4。

表 4 2001~2012 年我国新型干法水泥产量统计表

年份	水泥总产量 (万吨)	其中新型干法水泥产量 (万吨)	新型干法水泥比例 (%)
2001	66104	9372	14.2
2002	72500	12340	17.0
2003	86200	18970	22.0
2004	97000	31630	32.6
2005	106000	47270	44.6
2006	124000	60210	48.6
2007	136000	71490	52.6
2008	138800	85810	61.8
2009	165000	126850	76.9
2010	186800	149440	80.0
2011	209000	186000	89.0
2012	221000	203696	92.2

截至 2012 年已投产的新型干法生产线的产能及生产线情况统计见表 5。

表 5 2012 年底已投产的新型干法生产线统计

生产线规模 (t/d)	生产线数量 (条)	熟料产能 (万吨)	产能比重 (%)
≥5000	515	83080	52.4
[4000,5000)	83	10354	6.5
[3000,4000)	93	9012	5.7
[2000,3000)	591	44116	27.8
[1000,2000)	310	11207	7.1
<1000	35	789	0.5
合计	1627	158557	100.0

(以上数据来源于中国水泥协会)

5.2.2 水泥行业颗粒物排放现状

水泥工业一直是我国最大的工业粉尘排放源。根据模型计算的水泥工业排放量（雷宇，2008），我国水泥工业大气颗粒物排放量于 2001-2004 年间稳定在接近 800 万吨的水平；到 2005 年，由于新水泥工业排放标准的实施和大规模的新型干法水泥工艺替代立窑水泥工艺，颗粒物排放量迅速降低至 600 万吨左右。根据王红梅等（2012）的研究，2010 年我国水泥行业的粉尘排放总量约为 224.09 万吨。

水泥工业的粉尘主要产生于以下几个生产环节：（1）原料输送、破碎及储存；（2）生料粉磨及均化；（3）熟料煅烧；（4）煤粉制备过程；（5）熟料破碎、输送及储存；（6）水泥粉磨、储存及发运。水泥工业粉尘的无组织排放产生量主要取决于以下几个因素：（1）环保设施；（2）生产工艺；（3）管理水平。

5.2.3 水泥行业颗粒物排放标准

根据《水泥工业大气污染物排放标准》（GB 4915-2004），自 2010 年 1 月 1 日起，所有水泥生产线颗粒物排放标准如表 6 所示；自 2006 年 7 月 1 日起，所有水泥生产线作业场所颗粒物无组织排放标准如表 7 所示，表 7 中浓度限值的含义是指监控点处的总悬浮颗粒物（TSP）一小时浓度值。排放标准允许的最高值可用于估算减排潜力。

表 6 水泥工业颗粒物排放标准

生产过程	生产设备	颗粒物排放浓度 mg/m ³	单位产品颗粒物排放量 kg/t
矿山开采	破碎机及其它通风生产设备	30	-
水泥制造	水泥窑及窑磨一体机	50	0.15
	烘干机、烘干磨、煤磨及冷却机	50	0.15
	破碎机、磨机、包装机及其它通风生产设备	30	0.024
水泥制品生产	水泥仓及其它通风生产设备	30	-

表 7 水泥工业颗粒物无组织排放标准

作业场所	颗粒物无组织排放监控点	浓度限值，mg/m ³
水泥厂（含粉磨站），水泥制品厂	厂界外 20m 处	1.0（扣除参考值）

5.2.4 水泥行业颗粒物治理状况

水泥行业主要除尘技术包括袋式除尘技术、电除尘技术和电-袋复合式除尘技术，其中袋式除尘可根据滤料的不同分为普通滤料除尘与复膜袋式除尘，电除尘可按电场数目分类或根据有无高频电源分类。上述三种除尘技术颗粒物去除效率均较高，水泥厂选择使用何种除尘技术主要取决于入口颗粒物性质、颗粒物浓度、排放限值、使用场合及用户习惯等。但目前还不能排除一些较为落后的除尘方式的存在，综合考虑我国水泥行业除尘设施的实际情况与参数的可获得性，核算方法中将除尘方式分为四类：旋风除尘、湿式除尘、静电除尘、布袋除尘。

6 主要技术内容及说明

6.1 火电厂 PM_{2.5} 排放量核算方法

6.1.1 核算方法的确定

火电机组烟尘产生于燃料在燃烧器中的燃烧过程，产生的烟尘经过对颗粒物具有去除作用的烟气治理设施后，排放到大气中。火电机组 PM_{2.5} 排放取决于烟尘的产生量、PM_{2.5} 在烟尘中的质量百分比，以及治理设施对 PM_{2.5} 的去除效率。推荐采用物料衡算法和排放因子法计算火电机组烟尘和 PM_{2.5} 的产生量；并依据控制技术的分级除尘效率，计算火电机组的烟尘及 PM_{2.5} 排放量。

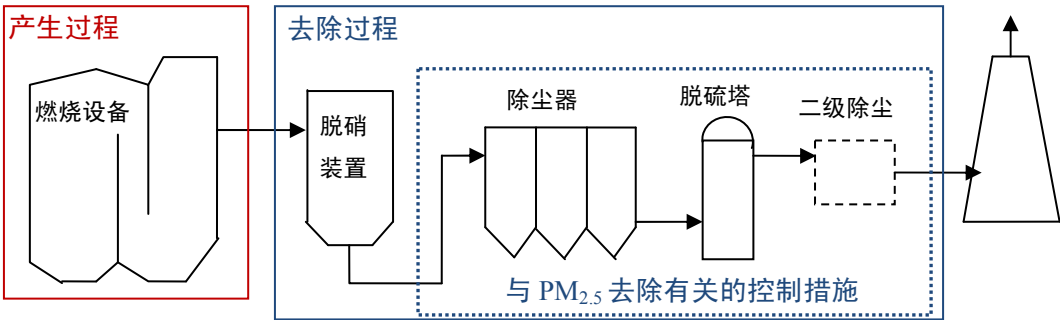


图 5 火电机组 PM_{2.5} 产生与去除过程

燃煤机组是核算的重点，由于燃煤机组 PM_{2.5} 产生与燃煤灰分密切相关，采用物料衡算法，依据单台机组的灰分，选取与机组类型相对应的灰分至 PM_{2.5} 转化系数，计算 PM_{2.5} 产生量；在此基础上依据控制技术对 PM_{2.5} 的去除效率，核算一次 PM_{2.5} 排放量。

同时为保证计算的完整性，给出了燃油、燃气机组 PM_{2.5} 排放量的计算方法。依据单台机组的燃料使用类型，选取相应的 PM_{2.5} 产生系数，计算 PM_{2.5} 产生量；若机组安装了治理设施，依据控制技术对 PM_{2.5} 的去除效率，核算一次 PM_{2.5} 排放量。

表 8 火电机组 PM_{2.5} 排放量核算方法

机组类型	燃煤机组	燃油、燃气机组
计算公式	$E = M \times A_{ar} \times \omega \times (1 - \eta / 100)$	$E = F \times EF \times (1 - \eta / 100)$
式中：	E——PM _{2.5} 排放量，t； M——机组发电（供热）煤炭消耗量，万 t； A _{ar} ——平均燃煤收到基灰分，%； ω——燃煤灰分至 PM _{2.5} 的转化系数，%； η——控制措施对 PM _{2.5} 的去除效率，%。	E——PM _{2.5} 排放量，t； F——燃油和燃气火电机组发电（供热）燃料消耗量，万 t（燃油消耗量），亿 Nm ³ （天然气消耗量）； EF——燃油和燃气火电机组的 PM _{2.5} 产生系数； η——除尘设施对 PM _{2.5} 的去除效率，%。

说明：

- 1、若燃煤机组使用煤炭的平均燃煤收到基灰分为 20%，则计算时 A 取 20；
- 2、若燃煤机组对应的燃煤灰分至 PM_{2.5}的转化系数为 5.1%，则计算时 ω 取 5.1；
- 3、若控制措施对应的 PM_{2.5}的去除效率为 99%，则计算时 η 取 99。

6.1.2 燃煤机组核算参数的获取

燃煤机组排放量计算的相关参数包括：机组的煤炭消费量（M）、平均燃煤收到基灰分（Aar）、燃煤灰分至 PM_{2.5} 的转化系数（ ω ）和治理设施对 PM_{2.5} 的去除效率（ η ）。本技术规范采取单台机组逐一核算的方式，机组的煤炭消费量（M）、平均燃煤收到基灰分（Aar）两个参数，由企业依据实际使用情况取值，地方环境保护主管部门可通过总量核查和统计数据进行校核；燃煤灰分至 PM_{2.5} 的转化系数（ ω ）和除尘设施对 PM_{2.5} 的去除效率（ η ），则分别依据燃煤机组炉型和污染控制措施的类型，使用本技术规范推荐的数据计算，推荐数据在综合分析国内外相关研究的基础上获得。

6.1.2.1 灰分至 PM_{2.5} 的转化系数（ ω ）

灰分至 PM_{2.5} 的转化系数（ ω ）由飞灰比（dfh）和 PM_{2.5} 在烟尘中的质量百分比两个因素共同决定。

1) 飞灰比

燃料中的灰分，一部分沉淀在锅炉的底灰中，另一部分形成飞灰夹带在烟气中，飞灰比（dfh）主要受燃烧方式的影响。下表列出了我国环境管理工作中推荐使用及他人在物料衡算时使用过的灰飞比数据。

表 9 不同炉型对应的飞灰比

炉型	飞灰比（%）	数据来源
煤粉炉	85	《燃料燃烧排放大气污染物物料衡算办法（暂行）》（2003年）
流化床	60	
煤粉炉	/	《工业污染物产生和排放系数手册》（1996年）
流化床	50-60	
煤粉炉	75~85	郝吉明，马广大，王书肖.大气污染控制工程（第三版）（2010年）
流化床	40-60	

飞灰比受炉型的影响，由于工艺技术没有发生改变，在燃煤机组 PM_{2.5} 计算中飞灰比引用了 2003 年由环保部推荐的在物料衡算时使用的数据，即煤粉炉飞灰比取 85%，流化床锅炉的飞灰比取 60%。

2) PM_{2.5}在烟尘中的质量百分比

PM_{2.5}在烟尘中的质量百分比是计算PM_{2.5}产生量的关键参数，国内外开展了大量实测研究，分析燃烧产生的烟尘中不同粒径颗粒物的分布状况。在技术规范编制的过程中，分析了 2003-2011年公开发表的我国燃煤电厂不同粒径颗粒物的质量百分比的实测数据，并综合比较了美国AP-42和欧盟RAINS模型中推荐使用数据。

表 10 文献研究所获得的不同粒径颗粒物的质量百分比 (%)

炉型	不同粒径颗粒物的质量百分比 (%)			文献
	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{>10}	
煤粉炉	6	23	77	美国环保署,空气污染物排放系数汇编(AP-42)
循环流化床 ^a	8	27	73	
煤粉炉	6	23	77	欧洲 RAINS 模型使用的排放因子
循环流化床	5	26	74	
煤粉炉	2.7	22.3	77.7	2004-2005 年间现场实测 7 台机组 (易红宏等, 2008)
循环流化床	7.77	32.39	67.61	
煤粉炉	3.5	28.0	72.0	基于实测的燃煤电厂细颗粒物排放特性分析与研究 (王圣等, 2011)
煤粉炉	5.8	21.7	78.3	8 家电厂 10 台机组实测 (Yu Zhao et al, 2010)
循环流化床	9.4	32.08	67.92	
循环流化床	3.37	16.54	83.46	440t/h 循环流化床机组实测 (徐飞等, 2007)
煤粉炉	2.42	39.35	60.65	一台机组实测 (刘建忠等, 2003)

a: 缺少循环流化床的产生因子数据, 采用抛煤机炉 (多管旋风除尘+粉煤灰回注);

研究发现, 燃烧产生的烟尘中不同粒径颗粒物的质量百分比受炉型的影响。

(1) 国内实测的煤粉炉燃烧产生的烟尘中 PM_{2.5} 质量百分比在 2.42%~5.8%之间, 数据变动幅度大; 美国 AP-42 和欧盟 RAINS 模型中推荐使用的煤粉炉粒径分布数据相同, 是大量实测研究得出的经验数值。综合分析后煤粉炉燃烧产生的烟尘中 PM_{2.5} 质量百分比, 引用了美国 AP-42 推荐使用的数据 (6%), 该数值大于国内实测研究的平均值 (4.1%), 可避免 PM_{2.5} 排放量被低估。

(2) 循环流化床国内研究较少, 仅有 3 台机组的实测数据; 美国 AP-42 中也缺少循环流化床数据, 采用抛煤机炉 (多管旋风除尘+粉煤灰回注) 的数据近似计算, 综合分析后引用了欧盟推荐的 PM_{2.5} 在烟尘中的质量百分比数据 (5%)。

3) 灰分至PM_{2.5}的转化系数 (ω)

依据上述研究, 通过引用的飞灰比和烟尘中 PM_{2.5} 质量百分比数据, 计算得出推荐使用的煤粉炉和循环流化床锅炉对应的灰分至 PM_{2.5} 的转化系数 (ω), 见表 11。

表 11 推荐使用的灰分至 PM2.5 的转化系数

炉型	飞灰比 (%)	PM _{2.5} 的质量百分比 (%)	灰分至 PM _{2.5} 的转化系数 (%)
煤粉炉	85	6	5.1
循环流化床	60	5	3

6.1.2.2 治理设施的分级去除效率 (η)

燃煤机组安装的治理设施对颗粒物有去除效果的包括：静电除尘器、袋式（电袋式）除尘器、湿法脱硫装置和二次湿法除尘设施。不同治理设施对颗粒物的去除效率存在差异，相同治理设施对不同粒径颗粒物的去除效率也不同。在技术规范编制的过程中，分析了2003-2011年公开发表的我国燃煤电厂治理设施颗粒物分级去除效率的实测数据，并综合比较了美国AP-42和欧盟RAINS模型中推荐使用数据。

表 12 文献研究所获得的燃煤电厂不同治理设施的分级除尘效率

除尘器类型	对不同粒径颗粒物的除尘效率 (%)			文献
	PM _{2.5}	PM ₁₀	TSP	
湿式除尘	50	81.74	94.0	美国环保署,空气污染 物排放系数汇编 (AP-42)
电除尘	96.0	97.65	99.2	
袋式除尘	98.33	99.13	99.8	
电除尘（1 电场）	93	95	97	欧洲 RAINS 模型使用的 数据
电除尘（2 电场）	96	99	99.9	
电除尘（3 电场及以上）	99	99.9	99.95	
湿式电除尘（二级除尘）	99	99.9	99.95	
袋式除尘	99	99.9	99.98	
静电除尘（三电场）	86.575	94.42	97.79	2004-2005 年间现场 实测 7 台机组（易红 宏等，2008）
静电除尘（四电场）	95.225	97.41	99.055	
静电除尘（五电场）	97.955	99.1	99.825	
静电除尘+湿法脱硫	97.405	99.025	99.855	
袋式除尘	99.72	99.76	99.94	
静电除尘（三电场）+湿法脱硫	96.55	99.07	99.78	基于实测的燃煤电厂 细颗粒物排放特性分 析与研究（王圣等， 2011）
静电除尘（四电场）+湿法脱硫	97.73	99.41	99.85	
静电除尘（五电场）+湿法脱硫	98.25	99.615	99.87	
湿式除尘	66.3	80.6	93.1	8 家电厂 10 台机组实 测（Yu Zhao et al, 2010）
静电除尘	92.0	95.7	98.6	
静电+湿法脱硫	96.3	98.6	99.7	
袋式除尘/电袋除尘	99.5	99.8	99.9	
静电除尘	90.6	98.5	99.36	一台机组实测（刘建 忠等，2003）

综合分析国内外相关研究：

(1) 国内静电除尘器对颗粒物的去除效率小于美国和欧盟推荐使用去除效率，反应出我国电厂使用的静电除尘器存在设计不规范、运行状况不佳的现状；近年来我国静电除尘技术也在不断进步，为准确计算我国燃煤机组PM_{2.5}排放量，静电除尘器或与静电除尘器有关的治理设施组合，推荐使用近期国内实测获得的分级除尘效率；

(2) 电场数对静电除尘器的去除效率有明显影响，为便于核算治理工程的减排效果，技术规范中分别给出不同电场数静电除尘器推荐使用的分级除尘效率；

(3) 研究表明，湿法脱硫设施对PM_{2.5}的去除效率存在影响，且我国燃煤机组普遍在静电除尘器下游配置湿法脱硫装置，技术规范中给出了“静电除尘器+湿法脱硫”推荐使用的分级除尘效率；

(4) 袋式（电袋式）除尘器国内研究较少，仅获取了两台机组的实测数据，且国内实测的袋式除尘器对PM_{2.5}的去除效率明显偏高；湿式电除尘（二级除尘）在国内应用较少，没有获得相关实测数据，故袋式（电袋式）除尘器、湿式电除尘（二级除尘）引用欧洲推荐使用的分级去除效率。

依据上述分析，结合我国燃煤机组治理设施的实际使用状况，推荐使用的治理设施分级去除效率见表13。

表 13 推荐使用的治理设施对颗粒物的分级去除效率

治理设施名称	PM _{2.5} 去除效率 (%)	烟尘去除效率 (%)
静电除尘器	92.6	98
静电除尘器（三电场）+湿法脱硫	96.6	99.7
静电除尘器（四电场）+湿法脱硫	97.7	99.8
静电除尘器（五电场）+湿法脱硫	98.3	99.8
静电除尘器（五电场）+湿法脱硫+二次除尘	99.0	99.9
袋式除尘器/电袋除尘器	99.0	99.9

6.1.3 燃油、燃气机组核算参数的获取

燃油、燃气机组排放量计算的相关参数包括：机组的燃料消费量（F）、PM_{2.5}产生系数（EF）和治理设施对 PM_{2.5} 的去除效率（ η ）。本技术规范采取单台机组逐一核算的方式，机组的燃料消费量（F）由企业依据实际使用情况取值，地方环境保护主管部门可通过总量核查和统计数据进行校核；PM_{2.5}产生系数（EF）和治理设施对 PM_{2.5} 的去除效率（ η ），则分别依据燃料类型和治理措施安装情况，使用本技术规范推荐的数据计算。

其中，燃油和燃气火电机组的 PM_{2.5}产生系数使用《大气细颗粒物 PM_{2.5}源排放清单编制技术指南》中所推荐的数据，见表 14。表 14 中所列数据与《大气细颗粒物 PM_{2.5}源排放清单编制技术指南》中所推荐数据的差异，是由于单位不同所致。

表 14 推荐使用的燃油和燃气机组的 PM_{2.5}产生系数

燃料类型	产生系数
柴油	5.0 t/万 t
煤油	8.1 t/万 t
燃料油	6.2 t/万 t
天然气	20.72t/亿 m ³

治理设施对 PM_{2.5} 的去除效率 (η) 的取值与燃煤机组相同, 参数获取方式同上。

6.2 水泥工业企业 PM_{2.5} 排放量核算方法

根据水泥生产过程中有多个颗粒物产生环节、每一环节颗粒物的产生系数与去除效率都不相同的特点, 以及我国水泥行业目前熟料生产线、水泥生产线、水泥粉磨站三者并存的现实状况, 在核算时选用排放因子法, 通过下列公式根据熟料与水泥的产量分别进行核算。

$$E = A \times \left[\sum_{i=1}^5 EF_i \times (1 - \eta_i / 100) + e_1 \right] + B \times [EF_C \times (1 - \eta_C / 100) + e_2]$$

式中: E——PM_{2.5} 排放量, kg;

A——生产线的熟料产量, t;

i——熟料生产过程产生 PM_{2.5} 的主要环节;

EF_i ——i 过程对应的 PM_{2.5} 产生系数, kg/t;

η_i ——i 过程所采用的除尘设施对 PM_{2.5} 的去除效率, %;

e₁——熟料生产过程的 PM_{2.5} 无组织排放因子, kg/t;

B——生产线的水泥产量, t;

EF_C ——水泥粉磨过程的 PM_{2.5} 产生系数, kg/t;

η_C ——水泥粉磨过程采用的除尘设施对 PM_{2.5} 的去除效率, %;

e₂——水泥粉磨过程的 PM_{2.5} 无组织排放因子, kg/t。

6.2.2 参数的获取

对于企业生产工艺, 生产规模, 熟料与水泥产量, 除尘设施等企业基本生产信息, 应由企业负责填报。对于核算过程中所选用的水泥各生产环节的 PM_{2.5} 产生系数、不同除尘设施对 PM_{2.5} 的去除效率以及生产过程中的 PM_{2.5} 无组织排放因子则需通过文献调研获取。

6.2.2.1 PM_{2.5} 的产生系数

水泥各生产环节的 PM_{2.5} 产生系数的确定是通过比较美国《空气污染物排放技术手册 AP-42》(1994)、欧洲环境署颁布的 EMEP/EEA 空气污染物排放清单指南 (2009)、《基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单》(雷宇等, 2008) 中的成果而得出的。根据这些文献中的成果可以发现水泥行业不同的生产环节的颗粒物产生系数不同, 并且产生的颗粒物中 PM_{2.5} 的质量分数也不同, 因此需要按照生产环节的不同分别计算 PM_{2.5} 产生系数。同时,

由于不同水泥生产工艺仅在熟料煅烧环节的 $PM_{2.5}$ 产生系数不同，因此在其他生产环节计算 $PM_{2.5}$ 产生系数时可对不同生产工艺做统一处理。由于我国目前大量存在着仅生产熟料的熟料生产线与不生产熟料仅加工熟料的水泥粉磨站，计算 $PM_{2.5}$ 产生系数时需要将水泥粉磨的部分单独考虑计算以使公式不仅适用于水泥生产线，而且适用于熟料生产线与水泥粉磨站。综合以上考虑将推荐采用的 $PM_{2.5}$ 产生系数总结至表 15。所参考的原始数据见表 16-表 18。

表 15 推荐使用的水泥生产各过程的 $PM_{2.5}$ 产生系数

序号 i	生产环节	$PM_{2.5}$ 产生点	$PM_{2.5}$ 产生系数 (kg/t)
1	原料准备	原料破碎、生料粉磨及均化、煤粉制备	7.5
2	熟料煅烧	新型干法窑	18.9
4		湿法窑	5.6
5		立窑	3.3
6	熟料冷却	窑头及熟料冷却	0.1
7	水泥制造	水泥粉磨	2.0

表 16 美国 AP-42 中各种窑型及工序的大气颗粒物产生系数

窑型/工序	除尘措施	颗粒物产生系数 (千克/吨水泥)	$PM_{2.5}$ 的质量分数 (%)	PM_{10} 的质量分数 (%)
湿法窑	无	65	7	24
湿法窑	电除尘	0.38	64	85
湿法窑	袋式除尘	0.23		
干法窑	无		18	42
干法窑	电除尘	0.5		
干法窑	袋式除尘	0.1	45	84
原材料加工	有	~0.06		
预热器	电除尘	0.13		
熟料冷却器	电除尘	0.048		

表 17 欧洲环境署颁布的 EMEP/EEA 空气污染物排放清单指南 (2009) 中各种窑型及工序的大气颗粒物排放系数

窑型/工序	除尘措施	颗粒物排放系数 (千克/吨水泥)	$PM_{2.5}$ 的质量分数 (%)	PM_{10} 的质量分数 (%)
产品与原材料加工	无	0.22	50	90
湿法窑	电除尘 (效率为 98.9%)	0.6	30	85
干法窑	电除尘 (效率为 99.5%)	2.5	38	52

表 18 《基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单》（雷宇等，2008）中各种窑型及工序的大气颗粒物产生系数

窑型/工序	颗粒物产生系数 (kg/t)	PM _{2.5} 的质量分数 (%)	PM _{2.5-10} 的质量分数 (%)	PM _{>10} 的质量分数 (%)
新型干法窑	105	18	24	58
湿法窑	80	7	17	76
立窑	30	11	20	69
熟料冷却机	15	0.54	8.06	91.4
生料磨/煤磨	56	13	26	61
水泥磨	50	4	12	84
破碎机	20	1	10	89

6.2.2.2 PM_{2.5} 的去除效率

水泥行业不同除尘设施对 PM_{2.5} 的去除效率参数的确定是通过比较欧洲环境署颁布的 EMEP/EEA 空气污染物排放清单指南（2009）、《基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单》（雷宇等，2008）中的成果而得出的。根据这些资料，水泥行业主要采用的除尘方式为静电除尘与袋式除尘。但基于我国的实际情况，水泥生产过程中仍有部分生产线采用的是较为落后的除尘方式，因此在选择 PM_{2.5} 去除效率时需要考虑到旋风除尘器与湿式除尘器的取值。由于目前缺少关于不同种类静电除尘器与袋式除尘器 PM_{2.5} 去除效率的研究，因此暂时不对不同种类静电除尘器与袋式除尘器的 PM_{2.5} 去除效率作进一步的区分。推荐的除尘设施对 PM_{2.5} 的去除效率见表 19。所参考的原始数据见表 20 与表 21。

表 19 推荐使用的除尘设施对 PM_{2.5} 的去除效率

除尘设施种类	PM _{2.5} 的去除效率 (%)
旋风除尘器	10
湿式除尘器	50
静电除尘器	96
袋式除尘器	99

表 20 欧洲环境署颁布的 EMEP/EEA 空气污染物排放清单指南（2009）中不同除尘设施的分粒径去除效率

除尘器种类	PM _{2.5} 去除效率	PM _{2.5-10} 去除效率	PM _{>10} 去除效率
静电除尘器	40	34	93
布袋除尘器	73	80	98

表 21 《基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单》（雷宇等，2008）中不同除尘设施的分

级去除效率/%

除尘器种类	PM _{2.5} 去除效率	PM _{2.5-10} 去除效率	PM _{>10} 去除效率
旋风除尘器	10	70	90
湿式除尘器	50	90	99
静电除尘器	93	98	99.5
布袋除尘器	99	99.5	99.9

6.2.2.3 PM_{2.5} 的无组织排放因子

根据王雅明等（水泥制造业产排污系数研究与应用，2009）的研究，对于采用静电除尘器或袋式除尘器的熟料生产线、水泥生产线或粉磨站，无组织排放的粉尘通常可占到粉尘总排放量的 20%以上，并且粉尘无组织排放因子随着生产线规模的扩大而减小。通过近似的取无组织粉尘中 PM_{2.5} 的质量分数为 10%，可得出熟料和水泥生产过程的 PM_{2.5} 的无组织排放因子，如表 22 所示。所参考的原始数据见表 23。

表 22 推荐的熟料和水泥生产过程的 PM_{2.5} 无组织排放因子

参数	产品名称	工艺类型	规模等级	PM _{2.5} 无组织排放系数 (kg/t 产品)
e1	熟料	新型干法	≥4000 吨熟料/日	0.01
		新型干法	2000-4000 吨熟料/日	0.02
		新型干法	<2000 吨熟料/日	0.04
		湿法	-	0.04
		立窑	≥10 万吨水泥/年	0.05
			<10 万吨水泥/年	0.1
e2	水泥	新型干法（及粉磨站）	≥60 万吨水泥/年	0.02
			<60 万吨水泥/年	0.03
		其他		0.04

表 23 《水泥制造业产排污系数研究与应用》（王雅明等，2009）中水泥行业颗粒物无组织排放系数表

产品名称	工艺名称	规模等级	颗粒物无组织排放系数 (kg/t 产品)
水泥	新型干法	≥4000 吨熟料/日	0.1
		2000-4000 吨熟料/日	0.2
		<2000 吨熟料/日	0.4
	湿法	-	0.4
	立窑	≥10 万吨水泥/年	0.5

	新型干法（粉磨站）	<10 万吨水泥/年	1
		≥60 万吨水泥/年	0.2
		<60 万吨水泥/年	0.3
熟料	新型干法	≥4000 吨熟料/日	0.1
	新型干法	<4000 吨熟料/日	0.2

6.2.3 核算过程

核算过程要充分发挥企业的主体作用。企业须如实填报相关的生产信息，并依据规定的核算方法对各条生产线的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量分别进行核算。各企业的生产信息及 $\text{PM}_{2.5}$ 排放信息最后汇总到环保部，并由环保部派专人进行随机抽样校核。在校核过程中若发现故意弄虚作假的情况要对企业从重处罚。

7 技术规范实施的建议

1) 国内关于火电机组燃烧产生的颗粒物粒径分布及治理设施的分级去除效率的实测开展较少，本技术规范中推荐的相关参数主要基于近年来国内研究的实测数据，并参考欧洲和美国的经验数据。随着锅炉燃烧、水泥生产技术的进步，以及除尘技术的发展， $\text{PM}_{2.5}$ 产生系数、除尘效率等参数都在动态变化。应当紧密跟踪相关技术的进展，及时根据最新的实验实测数据，对本规范中所用的参数进行更新与修订，以尽量减少 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量计算的不确定性。

2) 由于实测数据不支持，在本技术规范编制工作中未对高频电源等技术对提高静电除尘器除尘效率的技术进行单独分类。应针对性地对这类技术的应用效果开展实测研究，并根据技术在行业中的应用情况，及时增加先进技术除尘的相关参数。

3) 水泥行业 $\text{PM}_{2.5}$ 的无组织排放量除了受控制技术与生产工艺的影响之外还要受管理水平的影响，但由于目前难以对管理水平进行定量的分析，故在 $\text{PM}_{2.5}$ 无组织排放因子的选取时只对生产线的工艺与规模做了区分。在实际工作中可进一步考虑不同企业的管理水平，对计算参数进行调整。

4) 目前水泥控制技术的具体研究成果有限，在本核算方法中仅对水泥控制技术做了旋风除尘器、湿式除尘器、静电除尘器与袋式除尘器的四类区分。事实上，即便是同一类控制技术，如静电除尘器，由于具体工艺的不同，如三电场静电除尘器与五电场静电除尘器，也会导致 $\text{PM}_{2.5}$ 的去除效率的变化。建议进一步结合实测研究，对技术进行细分。