



电力工程设计手册

• 火力发电厂烟气治理设计 •

中国电力工程顾问集团有限公司
中国能源建设集团规划设计有限公司

编著

中国电力出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

电力工程设计手册

• 火力发电厂烟气治理设计 •

中国电力工程顾问集团有限公司 编著
中国能源建设集团规划设计有限公司

P
Engineering
Design Manual

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是《电力工程设计手册》系列手册中的一个分册，是按火力发电厂烟气污染治理系统的设计要求编写的实用性工具书，可以满足火力发电厂各设计阶段烟气污染治理系统设计内容的深度要求。本书主要内容包括火力发电厂烟气污染治理系统的设计原则、设计要点、设计计算、系统设计、设备选择与布置、设计内外接口、设计注意事项等，并在相关章节中简要介绍了火力发电厂相关生产工艺过程。

本书是依据最新标准的内容要求编写的，充分吸纳了火力发电厂烟气治理项目建设的先进理念和成熟技术，广泛收集了火力发电厂烟气污染治理系统设计的成熟案例，全面反映了近年来新建、扩建和改建火力发电厂工程中使用的烟气污染治理方面的新技术、新设备、新工艺，列入了大量成熟可靠的设计基础资料、技术数据和技术指标。

本书是供火力发电厂烟气污染治理设计、施工和运行管理人员使用的工具书，可作为其他行业从事烟气污染治理专业设计人员的参考书，也可供高等院校烟气污染治理相关专业的师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力工程设计手册. 火力发电厂烟气治理设计 / 中国电力工程顾问集团有限公司, 中国能源建设集团规划设计有限公司编著. —北京: 中国电力出版社, 2019.6

ISBN 978-7-5198-2269-9

I. ①电… II. ①中… ②中… III. ①火电厂—烟尘治理—设计—手册 IV. ①TM7-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 164634 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

版 次: 2019 年 6 月第一版

印 次: 2019 年 6 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 18.5

字 数: 656 千字

印 数: 0001—1500 册

定 价: 130.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社营销中心负责退换

电力工程设计手册

- 01 火力发电厂总图运输设计
- 02 火力发电厂热机通用部分设计
- 03 火力发电厂锅炉及辅助系统设计
- 04 火力发电厂汽轮机及辅助系统设计
- 05 火力发电厂烟气治理设计
- 06 燃气-蒸汽联合循环机组及附属系统设计
- 07 循环流化床锅炉附属系统设计
- 08 火力发电厂电气一次设计
- 09 火力发电厂电气二次设计
- 10 火力发电厂仪表与控制设计
- 11 火力发电厂结构设计
- 12 火力发电厂建筑设计
- 13 火力发电厂水工设计
- 14 火力发电厂运煤设计
- 15 火力发电厂除灰设计
- 16 火力发电厂化学设计
- 17 火力发电厂供暖通风与空气调节设计
- 18 火力发电厂消防设计
- 19 火力发电厂节能设计
-
- 20 架空输电线路设计
- 21 电缆输电线路设计
- 22 换流站设计
- 23 变电站设计
-
- 24 电力系统规划设计
- 25 岩土工程勘察设计
- 26 工程测绘
- 27 工程水文气象
- 28 集中供热设计
- 29 技术经济
- 30 环境保护与水土保持
- 31 职业安全与职业卫生

《电力工程设计手册》

编辑委员会

主 任	吴春利					
常务副主任	李宝金	刘广峰				
副 主 任	郑慧莉	龙 辉	史小恒	肖 兰	吕祥涛	杨炳良
	齐 斌	朱 军	张华伦	詹 扬	孙 波	
委 员	(按姓氏笔画排序)					
	叶勇健	冯 黎	庄 蓉	汤晓舒	许 华	孙向军
	李向东	李志刚	李彦利	杨 强	杨元峰	吴敬坤
	宋红军	张 涛	张欢畅	张运东	张国良	张爱军
	陈 健	武一琦	周 军	周丽琼	胡昌盛	高 华
	郭晓克	章 勇	阎欣军	梁 明	梁言桥	程正逢
	雷梅莹					

《电力工程设计手册》

秘 书 组

组 长	李宝金	刘广峰				
副 组 长	郑慧莉	龙 辉	陈文楷	杨元峰	张运东	
组 员	李 超	左 鹏	邹 歆	黄一凡	温作铭	许凌爽
	刘国芳	刘汝青	陈 丽			

《火力发电厂烟气治理设计》

编写组

主 编 龙 辉

副主编 陈 牧

参编人员 (按姓氏笔画排序)

邓文祥 叶勇健 田庆峰 付焕兴 李吉祥 邹 歆

张 乐 陈 勇 罗 杨 钟明慧 侯明晖 秦 学

贾 燕 顾 欣 陶 叶 黄晶晶

《火力发电厂烟气治理设计》

编辑出版人员

编审人员 郑艳蓉 韩世韬 孙 晨 胡顺增 梁 卉

出版人员 王建华 邹树群 黄 蓓 常燕昆 陈丽梅 郑书娟

王红柳 赵姗姗 单 玲

序 言

改革开放以来,我国电力建设开启了新篇章,经过40年的快速发展,电网规模、发电装机容量和发电量均居世界首位,电力工业技术水平跻身世界先进行列,新技术、新方法、新工艺和新材料得到广泛应用,信息化水平显著提升。广大电力工程技术人员在多年的工程实践中,解决了许多关键性的技术难题,积累了大量成功的经验,电力工程设计能力有了质的飞跃。

电力工程设计是电力工程建设的龙头,在响应国家号召,传播节能、环保和可持续发展的电力工程设计理念,推广电力工程领域技术创新成果,促进电力行业结构优化和转型升级等方面,起到了积极的推动作用。为了培养优秀电力勘察设计人才,规范指导电力工程设计,进一步提高电力工程建设水平,助力电力工业又好又快发展,中国电力工程顾问集团有限公司、中国能源建设集团规划设计有限公司编撰了《电力工程设计手册》系列手册。这是一项光荣的事业,也是一项重大的文化工程,彰显了企业的社会责任和公益意识。

作为中国电力工程服务行业的“排头兵”和“国家队”,中国电力工程顾问集团有限公司、中国能源建设集团规划设计有限公司在电力勘察设计技术上处于国际先进和国内领先地位,尤其在百万千瓦级超超临界燃煤机组、核电常规岛、洁净煤发电、空冷机组、特高压交直流输变电、新能源发电等领域的勘察设计方面具有技术领先优势;另外还在中国电力勘察设计行业的科研、标准化工作中发挥着主导作用,承担着电力新技术的研究、推广和国外先进技术的引进、消化和创新等工作。编撰《电力工程设计手册》,不仅系统总结了电力工程设计经验,而且能促进工程设计经

验向生产力的有效转化，意义重大。

这套设计手册获得了国家出版基金资助，是一套全面反映我国电力工程设计领域自有知识产权和重大创新成果的出版物，代表了我国电力勘察设计行业的水平和发展方向，希望这套设计手册能为我国电力工业的发展作出贡献，成为电力行业从业人员的良师益友。

汪建中

2019年1月18日

总前言

电力工业是国民经济和社会发展的基础产业和公用事业。电力工程勘察设计是带动电力工业发展的龙头，是电力工程项目建设不可或缺的重要环节，是科学技术转化为生产力的纽带。新中国成立以来，尤其是改革开放以来，我国电力工业发展迅速，电网规模、发电装机容量和发电量已跃居世界首位，电力工程勘察设计能力和水平跻身世界先进行列。

随着科学技术的发展，电力工程勘察设计的理念、技术和手段有了全面的变化和进步，信息化和现代化水平显著提升，极大地提高了工程设计中处理复杂问题的效率和能力，特别是在特高压交直流输变电工程设计、超超临界机组设计、洁净煤发电设计等领域取得了一系列创新成果。“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念和全面建成小康社会的奋斗目标，对电力工程勘察设计工作提出了新要求。作为电力建设的龙头，电力工程勘察设计应积极践行创新和可持续发展理念，更加关注生态和环境保护问题，更加注重电力工程全寿命周期的综合效益。

作为电力工程服务行业的“排头兵”和“国家队”，中国电力工程顾问集团有限公司、中国能源建设集团规划设计有限公司（以下统称“编著单位”）是我国特高压输变电工程勘察设计的主要承担者，完成了包括世界第一个商业运行的 1000kV 特高压交流输变电工程、世界第一个 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程在内的输变电工程勘察设计工作；是我国百万千瓦级超超临界燃煤机组工程建设的主力军，完成了我国 70% 以上的百万千瓦级超超临界燃煤机组的勘察设计公司，创造了多项“国内第一”，包括第一台百万千瓦级超超临界燃煤机组、第一台百万千瓦级超超临界空冷

燃煤机组、第一台百万千瓦级超超临界二次再热燃煤机组等。

在电力工业发展过程中，电力工程勘察设计工作者攻克了许多关键技术难题，形成了一整套先进设计理念，积累了大量的成熟设计经验，取得了一系列丰硕的设计成果。编撰《电力工程设计手册》系列手册旨在通过全面总结、充实和完善，引导电力工程勘察设计工作规范、健康发展，推动电力工程勘察设计行业技术水平提升，助力电力工程勘察设计从业人员提高业务水平和设计能力，以适应新时期我国电力工业发展的需要。

2014年12月，编著单位正式启动了《电力工程设计手册》系列手册的编撰工作。《电力工程设计手册》的编撰是一项光荣的事业，也是一项艰巨和富有挑战性的任务。为此，编著单位和中国电力出版社抽调专人成立了编辑委员会和秘书组，投入专项资金，为系列手册编撰工作的顺利开展提供强有力的保障。在手册编辑委员会的统一组织和领导下，700多位电力勘察设计行业的专家学者和技术骨干，以高度的责任心和历史使命感，坚持充分讨论、深入研究、博采众长、集思广益、达成共识的原则，以内容完整实用、资料翔实准确、体例规范合理、表达简明扼要、使用方便快捷、经得起实践检验为目标，参阅大量的国内外资料，归纳和总结了勘察设计经验，经过几年的反复斟酌和锤炼，终于编撰完成《电力工程设计手册》。

《电力工程设计手册》依托大型电力工程设计实践，以国家和行业设计标准、规程规范为准绳，反映了我国在特高压交直流输变电、百万千瓦级超超临界燃煤机组、洁净煤发电、空冷机组等领域的最新设计技术和科研成果。手册分为火力发电工程、输变电工程和通用三类，共31个分册，3000多万字。其中，火力发电工程类包括19个分册，内容分别涉及火力发电厂总图运输、热机通用部分、锅炉及辅助系统、汽轮机及辅助系统、燃气-蒸汽联合循环机组及附属系统、循环流化床锅炉附属系统、电气一次、电气二次、仪表与控制、结构、建筑、运煤、除灰、水工、化学、供暖通风与空气调节、消防、节能、烟气治理等领域；输变电工程类包括4个分册，内容分别涉及架空输电线路、电缆输电线路、换流站、变电站等领域；通用类包括8个分册，内容分别涉及电力系统规划、岩土工程勘察、工程测绘、工程水文气象、集中供热、技术经济、环境保护与水土保持、职业安全与职业卫生等领域。目前新能源发电蓬勃发展，编著单位将适时总结相关勘察设计经验，编撰有关新能源发电

方面的系列设计手册。

《电力工程设计手册》全面总结了现代电力工程设计的理论和实践成果，系统介绍了近年来电力工程设计的新理念、新技术、新材料、新方法，充分反映了当前国内外电力工程设计领域的重要科研成果，汇集了相关的基础理论、专业知识、常用算法和设计方法。全套书注重科学性、体现时代性、强调针对性、突出实用性，可供从事电力工程投资、建设、设计、制造、施工、监理、调试、运行、科研等工作的人员使用，也可供电力和能源相关教学及管理工作者参考。

《电力工程设计手册》的编撰和出版，凝聚了电力工程设计工作者的集体智慧，展现了当今我国电力勘察设计行业的先进设计理念和深厚技术底蕴。《电力工程设计手册》是我国第一部全面反映电力工程勘察设计成果的系列手册，且内容浩繁，编撰复杂，其中难免存在疏漏与不足之处，诚恳希望广大读者和专家批评指正，以期再版时修订完善。

在此，向所有关心、支持、参与编撰的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢！

《电力工程设计手册》编辑委员会

2019年1月10日

二

前 言

《火力发电厂烟气治理设计》是《电力工程设计手册》系列手册之一。

本书是在总结 20 世纪 90 年代末以来,特别是 2011 年以后火力发电厂烟气污染治理设计、施工、运行管理经验的基础上,充分吸收了火力发电厂烟气治理项目建设和运行管理的先进理念和成熟技术,广泛收集了火力发电厂烟气治理系统设计的成熟先进案例,全面反映了近年来新建、扩建和改建火力发电厂工程中使用的烟气污染物氮氧化物、烟尘、二氧化硫及其协同治理等方面的新技术、新设备、新工艺,对提高火力发电厂烟气治理设计质量,提升设计水平,实现火力发电厂烟气治理系统设计的标准化、规范化,促进绿色、节能、环保型火力发电厂建设将起到指导作用。

本书以实用性为主,按照现行相关规范、标准的内容规定,结合火力发电厂烟气治理系统的特点,以工艺系统为基本单元,分别论述了各个系统的设计原则、设计要点、设计计算方法、系统确定原则、设备选型及其布置、相关设计图纸内容、设计内外接口等。为使烟气治理专业技术人员了解火力发电厂相关生产工艺,科学合理地确定烟气治理系统设计方案,本书相关章节中简明扼要地介绍了火力发电厂相关生产工艺过程。

本书主编单位为中国电力工程顾问集团有限公司,参加编写的单位有中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司、中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司、中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司、中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司。本书由龙辉担任主编,负责总体框架设计和校稿,并编写前言、第一章、参考文献等;陈牧担任副主编;顾欣编写第二章;叶勇健、李吉祥、侯明晖、钟明慧、顾欣、黄晶晶编写第三章;秦学、付焕兴、罗杨、张乐、侯明晖编写第四章;陈勇、贾燕、田庆峰、陈牧、侯明晖编写第五章;黄晶晶、陶叶、邓文祥、邹歆编写第六章;黄晶晶整理附录。

本书是供火力发电厂烟气治理设计、施工和运行管理人员使用的工具书，可以满足火力发电厂前期工作、初步设计、施工图设计等阶段的深度要求。本书可作为其他行业从事烟气治理专业设计人员的参考书，也可供高等院校烟气治理相关专业的教师和学生参考使用。

《火力发电厂烟气治理设计》编写组

2018年12月

目 录

序言	
总前言	
前言	
第一章 综述	1
第一节 火力发电厂烟气主要污染物.....	1
第二节 国内外烟气污染物控制法律法规及标准.....	2
一、国外烟气污染物控制法律法规与标准.....	2
二、国内火力发电厂烟气污染物控制标准.....	6
三、国内烟气污染物控制法律法规及政策.....	6
第三节 火力发电厂烟气主要污染物控制流程.....	7
一、燃煤电厂烟气污染物控制流程.....	7
二、燃气-蒸汽联合循环电厂烟气污染物控制流程.....	9
第四节 火力发电厂烟气主要污染物控制技术.....	9
一、燃煤电厂烟气污染物控制技术.....	9
二、燃气-蒸汽联合循环电厂烟气污染物控制技术.....	15
第二章 氮氧化物处理工艺	16
第一节 氮氧化物形成机理及脱硝主要工艺.....	16
一、NO _x 的主要生成途径.....	16
二、烟气脱硝主要工艺.....	17
三、宽负荷脱硝.....	18
第二节 锅炉氮氧化物控制技术.....	21
一、低NO _x 燃烧器.....	21
二、空气分级燃烧.....	22
三、燃料分级燃烧.....	22
四、低氮燃烧技术应用效果.....	22
第三节 选择性非催化还原烟气脱硝工艺.....	22
一、系统说明.....	23
二、系统设计.....	25
三、设计计算.....	28
四、主要设备.....	28
五、设备布置.....	29
六、SNCR/SCR 联合脱硝工艺.....	29
七、工程案例.....	30
第四节 选择性催化还原烟气脱硝工艺.....	33
一、系统说明.....	33
二、系统设计.....	35
三、设计计算.....	36
四、主要设备.....	38
五、设备布置.....	40
六、工程案例.....	42
第五节 还原剂制备工艺.....	51
一、液氨.....	51
二、尿素.....	52
三、液氨储存和制备.....	52
四、尿素储存及氨气制备系统.....	60
第三章 烟尘处理工艺	74
第一节 除尘器分类及特性.....	74
一、粉尘捕集机理.....	74
二、除尘器性能指标.....	74
三、除尘器的特性.....	75
第二节 电除尘器.....	75
一、工作原理.....	75
二、设备本体及布置.....	78
三、主要技术参数及计算.....	81
四、主要技术规范.....	83
五、典型应用案例.....	84
第三节 袋式除尘器.....	86

一、工作原理及特点	86	一、系统说明	213
二、设备本体及布置	87	二、系统设计	215
三、主要技术参数及计算	90	三、设计计算	220
四、主要技术规范	93	四、主要设备	221
五、典型应用案例	95	五、设备布置	222
第四节 电袋复合除尘器	99	六、工程案例	222
一、电袋复合除尘器的工作原理及特点	100	第五章 烟气多污染物协同控制技术	226
二、设备本体及布置	100	第一节 煤粉锅炉多污染物协同控制技术	226
三、主要技术参数及计算	102	一、技术原理	226
四、主要技术规范	102	二、工艺流程	226
五、工程案例	103	三、采用低低温电除尘器工艺流程的 主要特点	227
第五节 湿式电除尘器	108	四、系统设计	230
一、工艺原理	108	五、设计计算	233
二、设备本体及附属系统布置	110	六、主要设备	235
三、主要技术参数及计算	114	七、工程案例	236
四、主要技术规范	115	第二节 循环流化床锅炉多污染物协同 控制技术	254
五、工程案例	116	一、NO _x 协同控制技术	254
第四章 二氧化硫处理工艺	123	二、SO _x 协同控制技术	254
第一节 脱硫技术路线	123	三、烟尘协同控制技术	256
第二节 石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺	123	四、汞及其化合物协同控制技术	257
一、系统说明	124	五、循环流化床锅炉多污染物协同 控制技术路线	258
二、系统设计	126	六、工程案例	258
三、设计计算	139	第六章 其他烟气处理技术	261
四、主要设备	143	第一节 烟气脱汞技术	261
五、设备布置	156	一、烟气脱汞主要工艺	261
六、工程案例	164	二、美国燃煤电厂烟气脱汞工艺介绍	263
七、典型工程脱硫装置主要配置及 厂用电量	169	第二节 烟气二氧化碳捕集技术	266
第三节 海水法烟气脱硫工艺	171	一、燃烧前捕集技术	266
一、系统说明	171	二、燃烧后捕集技术	267
二、系统设计	172	三、MEA 碳捕集工程案例	270
三、设计计算	175	四、富氧燃烧技术	274
四、主要设备	177	五、二氧化碳的封存和利用	275
五、设备布置	181	附录	277
六、工程案例	183	附录 A 我国火力发电厂燃用煤的 煤质情况	277
七、国内外部分海水脱硫装置设计数据	197	主要量的符号及其计量单位	279
第四节 氨法烟气脱硫工艺	198	参考文献	280
一、系统说明	198		
二、系统设计	200		
三、设计计算	204		
四、主要设备	205		
五、设备布置	207		
六、工程案例	207		
第五节 烟气循环流化床半干法脱硫工艺	213		

综 述

火力发电厂利用可燃物质作为燃料生产电能,即将燃料的化学能通过燃烧转化为热能,又通过汽轮机转化为机械能,最后驱动发电机输出电能。火力发电厂一般由燃料系统、燃烧系统、汽水系统、电气系统和控制系统组成。燃料在燃烧过程中不可避免地产生烟气,不同类型的燃料产生烟气的成分不同,烟气中的主要污染物成分也有所差别。

本章主要介绍以燃煤机组和燃气-蒸汽联合循环机组为代表的火力发电厂,包括火力发电厂烟气主要污染物、国内外火力发电厂烟气污染物控制法律法规及标准、火力发电厂烟气主要污染物控制流程与控制技术等。

第一节 火力发电厂烟气
主要污染物

目前,火力发电厂的主要类型包括燃煤机组、燃气-蒸汽联合循环机组等。燃煤锅炉烟气的主要成分为 N_2 、 O_2 、颗粒物、 CO_2 、 SO_2 、氮氧化物(NO_x)、水蒸气等,另外还含有少量量的 CO 、 SO_3 、 H_2 、 CH_4 和其他烃类化合物(C_nH_m)。燃气-蒸汽联合循环电厂烟气的主要成分是 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 CO 、 SO_2 、 SO_3 、氮氧化物、硫化氢、氨、少量挥发性有机物和固体颗粒物等。除了氮气、氧气和 CO_2 ,烟气中的其他成分不同程度地对环境造成一定的污染,其中, CO_2 作为一种温室气体,影响全球的气候变化。

1. SO_2 的来源、特征及危害

化石燃料中的硫元素在燃烧状态下大部分转化为 SO_2 ,少部分转化为 SO_3 和气态硫酸盐。大气中的 SO_2 主要来自于煤炭,其次是石油,天然气中含硫较少。

硫氧化物排放主要是由于煤中硫的存在而产生的。硫在煤炭中以无机硫或有机硫的形式存在,燃烧过程中绝大多数硫氧化物以 SO_2 的形式产生并排放。此外还有极少部分被氧化为 SO_3 吸附到颗粒物上或以气态排放。

SO_2 是一种无色气体,不易燃烧,不易爆。当空

气中 SO_2 的浓度含量低于 $1\mu L/L$ 而高于 $0.1\mu L/L$ 时,人便能感觉到不同的气味;当 SO_2 浓度高于 $3.0\mu L/L$ 时,空气有辛辣、刺激性气味。 SO_2 暴露于空气中能部分转化为 SO_3 和硫酸,其盐类的转化主要依靠光化学氧化或接触催化氧化过程。

硫氧化物对环境的影响主要包括影响空气的能见度,以及以酸雨的形式腐蚀材料、破坏植被和岩石等。目前,单纯的 SO_2 对于人健康的影响在流行病学方面并不确定,但硫氧化物在高湿环境中作为颗粒物对人健康的影响较大。

2. SO_3 的来源、特征及危害

燃煤锅炉中 SO_3 的典型转化率低于1%。去除氮氧化物的催化工艺会促进 SO_2 氧化成 SO_3 ,转化率为0.5%~2%。当烟气温度低于 $260^\circ C$ 时, SO_3 易与烟气中的水蒸气结合形成硫酸。硫酸易创造严重的腐蚀条件。

当烟气经过湿法烟气脱硫系统后,烟气中的硫酸易冷凝形成酸雾。酸雾是烟气中颗粒物的重要贡献者。酸雾直径低于 $0.5\mu m$,但少量酸雾(低于 $5\mu L/L$)即导致可见的蓝烟,即使蓝烟中不含固体颗粒物。

3. NO_x 的来源、特征及危害

NO_x 因氮元素和氧元素的组成不同而存在多种形式,火力发电厂烟气中的 NO_x 主要来源于空气中的氮气在高温下氧化, NO_x 主要由一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO_2)组成。煤炭燃烧过程中排放的 NO_x 是 NO 、 NO_2 及氧化亚氮(N_2O)等的总称,其中以 NO 为主,约占95%。 NO_x 的形成主要包括热力型 NO_x 和燃料型 NO_x 。热力型 NO_x 的形成与燃烧温度密切相关,燃料型 NO_x 的形成主要取决于燃料含氮量,电厂燃用煤炭收到基含氮量多在2%以下。

NO 在常温常压下为无色气体,在空气中易被 O_3 和光化学作用氧化成 NO_2 。 NO_2 在常温常压下为棕红色气体,能溶于水生成硝酸和亚硝酸,具有腐蚀性。

NO 能和人体血红蛋白结合,导致血液输氧能力下降。 NO 对血红蛋白的亲性约为 CO 的1400倍,相

当于 O₂ 的 30 万倍。

NO₂ 是刺激性气体，毒性很强，对呼吸器官有较强的刺激作用，可引起气管炎、肺炎甚至肺气肿，还可与血红蛋白结合，引起组织缺氧。

此外，大气中的 NO_x 与有机烃反应可形成多种光化学反应产物，导致光化学污染。

4. 烟尘的来源、特征及危害

烟尘是煤燃烧过程中产生，并释放到烟气中的颗粒物，包括固态或液态的有机或无机颗粒物。一般情况下，烟气中颗粒物的粒径为 1~100μm，其中，粒径小于 10μm 和小于 2.5μm 的颗粒物分别称为 PM₁₀ 和 PM_{2.5}，两者均属于细颗粒。当颗粒物粒径小于 1μm 时，颗粒物易发生凝并作用。细颗粒来源于煤的燃烧，同时也有一部分来自 SO₂、NO_x 和可挥发性有机物等在大气作用下发生的化学转化。烟气中的烟尘排放会影响透光度、加剧 SO₂ 对人呼吸道的不良作用等。相比于大颗粒烟尘，PM_{2.5} 对人体更加有害。

燃煤电厂烟气中的烟尘浓度与锅炉炉型、燃煤灰分有关。煤粉炉烟尘排放的初始浓度大多为 10~30g/m³；循环流化床锅炉由于主要燃用劣质煤或煤矸石，烟尘排放的初始浓度大多为 15~50g/m³。

5. 汞及其他重金属的来源、特征及危害

重金属排放来源于煤炭中含有的重金属成分，大部分重金属（砷、镉、铬、铜、汞、镍、铅、锌、钒）以化合物形式（如氧化物）和气溶胶形式排放。煤中的重金属含量通常比燃料油和天然气高几个数量级。在众多重金属中，汞在煤炭中经燃烧后多以单质汞的形式存在（部分被氧化成氯化汞），具有易挥发的特点。烟气中汞的浓度为每立方米微克数量级。目前，常规的烟气处理工艺无法去除单质汞。某些化合态的汞具有强毒性。汞进入水体后被微生物转化为甲基汞，易富集在鱼类脂肪中，从而进入食物链。

6. CO 的来源、特征及危害

CO 为无色无臭气体，易燃，在空气中燃烧呈蓝色火焰。烟气中的 CO 多源于煤炭、天然气或其他有机物质的不完全燃烧。常温常压下，CO 在空气中的存在比较稳定，是具有一定累积性的大气污染物。CO

与人体血液中的血红蛋白结合，生成碳氧血红蛋白，引起缺氧症状，接触时间较长则会引起中枢神经系统功能损伤、心肺功能变异等，甚至死亡。

7. CO₂ 的来源、特征及危害

CO₂ 是温室气体之一，主要来源于化石燃料和碳氢化合物的燃烧。全球大气中 CO₂ 浓度的升高被认为是全球气候变化的主要原因之一。提高能源生产和利用效率，用生物质燃料替代化石燃料或进行 CO₂ 捕集与封存是 CO₂ 减排的重要途径。

第二节 国内外烟气污染物控制法律法规及标准

一、国外烟气污染物控制法律法规与标准

1. 美国

美国污染物排放标准是美国法律的一部分，编入了《联邦法规法典》的第 40 编。与火力发电厂污染物控制关系最为密切、最重要的法案是美国 1970 年颁布的《清洁空气法案》（Clean Air Act, CAA）。该法案是美国首部控制火力发电厂大气污染排放的国家立法。最早与火力发电厂大气污染物排放相关的标准是美国环保部（Environmental Protection Agency, EPA）制定的于 1971 生效的《新污染源性能标准》，适用于标准颁布后开始建造或改建污染源的电厂，并规定“当某一企业有多个污染源，当某一污染源新建或改建后，则该企业的多油污染源都要按照由 EPA 颁发的污染控制标准《新污染源性能标准》（New Source Performance Standards, NSPS）的要求管理”，后来又经过 1978、1997、2005、2007 年等多次修订或完善。目前，美国燃煤电厂执行的标准和规则是最全面、最细致的标准之一。

根据美国 NSPS 中专门针对电厂大气污染物排放的《电气设备蒸汽发电机性能标准》（Standards of Performance for Electric Utility Steam Generating Units），美国控制的电厂对象是热功率大于 73MW 的发电机组。美国燃煤发电锅炉烟尘、SO₂ 和 NO_x 排放质量限值见表 1-1~表 1-3。

表 1-1 美国燃煤发电锅炉烟尘排放质量限值

适用机组投运时间	煤种	排放限值 (30 天平均)		折算成 mg/m ³ (标准状态)	备注
2005 年 2 月 28 日以前	全部	13ng/J (0.030 lb/MBtu)		36.9	
2005 年 2 月 28 日— 2011 年 5 月 3 日	全部	总能量输出	18ng/J [0.14 lb/ (MW · h)]	—	不考核除尘效率
		或热量输入	6.4ng/J (0.015 lb/MBtu)	18.5	不考核除尘效率