

HUODIANCHANG DAQIWURANWU  
PAIFANG CESHJ JISHU

# 火电厂大气污染物 排放测试技术

内蒙古电力科学研究院 ■ 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

HUODIANCHANG DAQIWURANWU  
PAIFANG CESHJ JISHU

# 火电厂大气污染物 排放测试技术

内蒙古电力科学研究院 ■ 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书以火电厂大气污染物测试技术为出发点,将不同污染物的在线测试方法和离线测试方法进行分析对比,分析各种测试方法的原理,并给出了不同测试仪器、不同测试方法的优势和劣势。

本书从固定污染源烟气排放连续监测系统和现场污染物测试仪器的实际应用角度出发,汇总了目前我国 CEMS 仪器设备和污染物测试仪器的技术现状及应用情况,系统介绍了不同原理 CEMS 仪器设备和污染物测试仪器的结构、各组成部分及其现场应用的环境特点和使用现状;依据目前对仪器设备应用的环境管理要求,结合当前对污染源监测的技术需求和污染现状,探讨了未来我国 CEMS 监测技术和污染物排放测试技术的发展方向和技术研究等内容。

本书从介绍不同原理仪器设备的结构特点和应用需求入手,着重描述仪器设备的应用范围、新技术特点及其必不可少的各方面质量保证和质量措施,为进一步推动仪器设备研发、生产、安装、使用等各个环节的质量控制要求,以及仪器设备的技术进步和数据使用提供重要支撑。本书可供从事火电厂大气污染物排放测试方面的工作人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

火电厂大气污染物排放测试技术/内蒙古电力科学研究院编著. —北京:中国电力出版社,2017.9  
ISBN 978-7-5198-1073-3

I. ①火… II. ①内… III. ①火电厂—大气污染物—排污量—测试技术 IV. ①X773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 197486 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>

责任编辑:杨 帆

责任校对:马 宁

装帧设计:赵姗姗

责任印制:蔺义舟

---

印 刷:北京市同江印刷厂

版 次:2017 年 9 月第一版

印 次:2017 年 9 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:13.5

字 数:289 千字

印 数:0001—2000 册

定 价:49.00 元

---

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

# 《火电厂大气污染物排放测试技术》 编委会

主 任 张叔禹

副主任 吴集光 刘永江

主 编 禾志强

副主编 赵 宇 姜 冉 张志勇 郭江源  
那 钦 赵全中

2015 年底，环境保护部、国家发展改革委、国家能源局联合发布了《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》，明确要求 2020 年前对燃煤机组全面实施超低排放和节能改造。《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》中提出“全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造是一项重要的国家专项行动，既有利于节能减排、促进绿色发展、增添民生福祉，又有利于扩大投资、促进煤电产业转型升级、相关装备制造业走出去”。《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》中要求“到 2020 年，全国所有具备改造条件的燃煤电厂力争实现超低排放（即在基准氧含量 6% 条件下，烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度分别不高于 10、35、50mg/m<sup>3</sup>）。全国有条件的新建燃煤发电机组达到超低排放水平”。2016 年初的政府工作报告中提出，重拳治理大气雾霾和水污染，二氧化硫、氮氧化物排放量分别下降 3%，全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造。火电厂大气污染物的超低浓度要求，对于相关的污染物测试技术来说既是一次创新的机会，也是一次严峻的挑战，如何在超低浓度下控制其自身误差、保持其重复性和稳定性，是每一种污染物测试技术都面临的考验。

2016 年底，为贯彻落实《关于加快推进生态文明建设的意见》和《国家创新驱动发展战略纲要》，提升环境科技创新能力，环境保护部和科学技术部印发了《国家环境保护“十三五”科技发展规划纲要》。纲要中提出：“开展环境监测任务优化研究，以需求导向性的监测指标体系为基础，构建多手段复合型的监测业务技术体系。开展覆盖环境监测全过程的质控体系研究，重点研究健全现场采样与现场监测质量保证和质量控制（QA/QC）技术体系，解决现场质控手段薄弱问题。”《国家环境保护“十三五”科技发展规划纲要》中对环境监测优化的要求和对质控体系的重视，也正是各种火电厂大气污染物测试技术面临的实际问题。

固定污染源烟气排放连续监测系统和现场污染物测试仪器，是火电厂监测烟气污染物排放的现代化工具，可连续、非连续监测污染物的排放浓度和

排放总量，能为我国污染物排放总量控制计划及酸雨控制计划的实施提供强有力的保障，为排污收费制度的实施提供科学的定量依据，是环境管理、环境监测、排污收费、污染物治理的可靠技术工具。

本书共分十一章。第一章介绍了目前火电厂大气污染物的产生原因及组成，并对其相关情况进行了介绍；第二章详细介绍了 CEMS 烟气固定污染源烟气排放连续监测系统，包括其系统组成和主要的设计理念；第三~十一章分别介绍了  $O_2$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$ 、烟尘、 $SO_3$ 、 $NH_3$ 、Hg、CO、烟气湿度的测试技术，分析了相应技术在工程应用中的优点和问题，并结合工程案例，分析了各项测试技术的实用性，为实际工程中的技术、设备甄选提供了依据。

本书在编写过程中，得到了内蒙古电力（集团）有限责任公司相关领导、内蒙古电力科学研究院领导和同事的大力支持、帮助以及自筹科技项目资金的资助（电科院〔2017〕1号、电科院〔2015〕46号）；内蒙古电力科学研究院的张铭、李浩杰、张志勇、沈建军、吴宇、李霞、贺帅等同志参与了现场测试试验，在此对他们表示真挚的谢意！

除了本书所列的参考文献外，编者在编写书稿过程中还参阅了许多近年来我国电力、环保、化工等领域专家及专业技术人员撰写的报告、文献、总结资料，恕难一一详列，在此一并向各位专家、同仁致谢！

限于编者水平，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正！

编委会

2017年7月

# 目 录



## 火电厂大气污染物排放测试技术

### 前言

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 火电厂大气污染物的产生 .....           | 1  |
| 第一节 火电厂大气污染物的来源 .....           | 1  |
| 第二节 煤燃烧过程中污染物的形成 .....          | 4  |
| 第二章 烟气自动监控系统 (CEMS) .....       | 8  |
| 第一节 CEMS 的作用 .....              | 8  |
| 第二节 CEMS 的原理及测试技术 .....         | 9  |
| 第三节 CEMS 的安装要求、验收要求、运行及维护 ..... | 10 |
| 第三章 O <sub>2</sub> 测试技术 .....   | 13 |
| 第一节 电化学法 .....                  | 13 |
| 第二节 氧化锆法 .....                  | 29 |
| 第三节 顺磁法 .....                   | 37 |
| 第四节 激光测氧法 .....                 | 41 |
| 第五节 离线测试和在线测试数据的比对实例 .....      | 43 |
| 第四章 SO <sub>2</sub> 测试技术 .....  | 52 |
| 第一节 甲醛吸收 - 副玫瑰苯胺分光光度法 .....     | 52 |
| 第二节 碘量法 .....                   | 54 |
| 第三节 定电位电解法 .....                | 55 |
| 第四节 非分散红外法 .....                | 59 |
| 第五节 傅里叶变换红外法 .....              | 63 |
| 第六节 紫外吸收法 .....                 | 65 |
| 第七节 紫外荧光法 .....                 | 67 |
| 第八节 离线测试和在线测试数据的比对实例 .....      | 69 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| <b>第五章 NO<sub>x</sub>测试技术</b>     | 73  |
| 第一节 标准中关于 NO <sub>x</sub> 测试技术的要求 | 73  |
| 第二节 电化学法                          | 77  |
| 第三节 红外光谱法                         | 81  |
| 第四节 紫外光谱法                         | 84  |
| 第五节 其他方法                          | 87  |
| 第六节 离线测试和在线测试数据的比对实例              | 88  |
| <b>第六章 烟尘测试技术</b>                 | 92  |
| 第一节 标准中关于烟尘测试的要求                  | 92  |
| 第二节 称量法                           | 93  |
| 第三节 $\beta$ 射线法                   | 96  |
| 第四节 光学法、光散射法                      | 98  |
| 第五节 其他方法                          | 99  |
| 第六节 离线测试和在线测试数据的比对实例              | 100 |
| <b>第七章 SO<sub>2</sub>测试技术</b>     | 104 |
| 第一节 标准中关于 SO <sub>2</sub> 测试技术的要求 | 104 |
| 第二节 冷凝法                           | 105 |
| 第三节 异丙醇法                          | 107 |
| 第四节 螺旋管法                          | 109 |
| 第五节 其他方法                          | 110 |
| 第六节 离线测试实例及在线测试的介绍                | 111 |
| <b>第八章 NH<sub>3</sub>测试技术</b>     | 116 |
| 第一节 标准中关于 NH <sub>3</sub> 测试技术的要求 | 117 |
| 第二节 激光原位法                         | 118 |
| 第三节 化学发光法                         | 122 |
| 第四节 傅里叶变换红外法                      | 125 |
| 第五节 其他方法                          | 127 |
| 第六节 离线测试和在线测试数据的比对实例              | 128 |
| <b>第九章 Hg 测试技术</b>                | 136 |
| 第一节 标准中关于 Hg 测试技术的要求              | 136 |
| 第二节 烟气中汞的采集方法                     | 137 |
| 第三节 烟气中汞的检测分析方法                   | 142 |
| 第四节 离线测试实例                        | 150 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第十章 CO 测试技术 .....          | 153 |
| 第一节 标准中关于 CO 测试技术的要求 ..... | 154 |
| 第二节 奥氏气体分析法 .....          | 155 |
| 第三节 电化学法 .....             | 157 |
| 第四节 非分散红外吸收法 .....         | 161 |
| 第五节 气相色谱法 .....            | 165 |
| 第六节 CO 在线测试方法 .....        | 167 |
| 第十一章 烟气湿度测试技术 .....        | 169 |
| 第一节 标准中关于湿度测试的要求 .....     | 169 |
| 第二节 电容式传感器测试法 .....        | 171 |
| 第三节 阻容式传感器测试法 .....        | 173 |
| 第四节 干湿氧法 .....             | 176 |
| 第五节 激光光谱法 .....            | 178 |
| 第六节 红外光度法 .....            | 181 |
| 第七节 干湿球法 .....             | 183 |
| 第八节 其他方法 .....             | 188 |
| 第九节 烟气湿度在线测试方法 .....       | 199 |
| 参考文献 .....                 | 201 |

## 第一章

# 火电厂大气污染物的产生

## 第一节 火电厂大气污染物的来源

煤作为主要的化石燃料，在世界各国能源供应中占有重要地位。我国是世界上最大的煤炭生产和消费国，也是世界上为数不多的以煤炭为主要一次能源的国家之一，煤炭的低效利用和由燃烧造成的环境污染一直是制约我国可持续发展的最重要的因素之一。我国电力生产主要以燃煤机组为主，煤炭在火力发电构成中占 90% 以上。火电厂以煤作为主要原料，煤燃烧产生热量，通过一系列的能量转化，最终将热能转化为电能。我国目前发电用煤燃用的基本上是没有经过洗选的动力煤，煤质较差，煤燃烧过程中形成并释放了大量大气污染物，致使火力发电行业成为我国  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、烟尘、 $\text{CO}_2$  等大气污染物的主要排放源，此外，火电厂生产环节中还会产生粉尘、噪声、电磁辐射、废水、废渣等环境污染物。

煤是由具有多种结构形式的有机物和不同种类的矿物质组成的混合物。煤的组成指的是岩相组成和化学组成。

从化学观点来看，煤是由有机组分和无机组分组成的，以有机质为主体。无机组分主要包括黏土矿物、石英、方解石、石膏、黄铁矿等矿物质和水。有机组分主要是由碳、氢、氧、氮、硫等元素构成的复杂的高分子有机化合物的混合物。煤中存在的元素有数十种之多，但通常所指的煤的元素组成主要是五种元素，即碳、氢、氧、氮和硫，其中，碳、氢、氧占有机质的 95% 以上。此外，还有极少量的磷和其他含量很少，种类繁多的其他元素，一般不作为煤的元素组成，而只当作煤中伴生元素或微量元素。通常，主要用工业分析和元素分析方法来分析煤的主要成分和研究煤的性质。

### 1. 煤中的碳

一般认为，煤是由带脂肪侧链的大芳环和稠环组成的。这些稠环的骨架是由碳元素构成的。因此，碳元素是组成煤的有机高分子的最主要元素。同时，煤中还存在着少量的无机碳，主要来自碳酸盐类矿物，如石灰岩和方解石等。碳含量随煤化度的升高而增加。在我国泥炭中干燥无灰基碳含量为 55%~62%；成为褐煤以后碳含量就增加到 60%~76.5%；烟煤的碳含量为 77%~92.7%；一直到高变质的无烟煤，碳含量为

88.98%。个别煤化度更高的无烟煤，其碳含量多在90%以上，整个成煤过程，也可以说是增碳的过程。

## 2. 煤中的氢

氢是煤中第二个重要的组成元素。除有机氢外，在煤的矿物质中也含有少量的无机氢。它主要存在于矿物质的结晶水中，如高岭土( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )、石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )等都含有结晶水。在煤的整个变质过程中，随着煤化度的加深，氢含量逐渐减少，煤化度低的煤，氢含量大；煤化度高的煤，氢含量小。总的规律是氢含量随碳含量的增加而降低。尤其在无烟煤阶段就尤为明显。当碳含量由92%增至98%时，氢含量则由2.1%降到1%以下。通常是碳含量在80%~86%之间时，氢含量最高。即在烟煤的气煤、气肥煤段，氢含量能高达6.5%。在碳含量为65%~80%的褐煤和长焰煤段，氢含量多数小于6%。但变化趋势仍是随着碳含量的增大而氢含量减小。

## 3. 煤中的氧

氧是煤中第三个重要的组成元素。它以有机和无机两种状态存在。有机氧主要存在于含氧官能团，如羧基( $-\text{COOH}$ )、羟基( $-\text{OH}$ )和甲氧基( $-\text{OCH}_3$ )等；无机氧主要存在于煤中水分、硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐和氧化物等中。煤中有机氧随煤化度的加深而减少，甚至趋于消失。褐煤在干燥无灰基碳含量小于70%时，其氧含量可高达20%以上。烟煤碳含量在85%附近时，氧含量几乎都小于10%。当无烟煤碳含量在92%以上时，其氧含量都降至5%以下。

## 4. 煤中的氮

煤中的氮含量比较少，一般为0.5%~3.0%。氮是煤中唯一的完全以有机状态存在的元素。煤中有机氮化物被认为是比较稳定的杂环和复杂的非环结构的化合物，其原生物可能是动、植物脂肪。植物中的植物碱、叶绿素和其他组织的环状结构中都含有氮，而且相当稳定，在煤化过程中不发生变化，成为煤中保留的氮化物。以蛋白质形态存在的氮，仅在泥炭和褐煤中发现，在烟煤中很少，几乎没有发现。煤中氮含量随煤的变质程度的加深而减少。它与氢含量的关系是，随氢含量的增高而增高。

## 5. 煤中的硫

煤中的硫分是有害杂质，它能使钢铁热脆、设备腐蚀、燃烧时生成的二氧化硫( $\text{SO}_2$ )污染大气，危害动、植物生长及人类健康。所以，硫分含量是评价煤质的重要指标之一。煤中含硫量的多少，是与煤化度的深浅没有明显关系的，无论是变质程度高的煤或变质程度低的煤，都存在着或多或少的有机硫。煤中硫分的多少与成煤时的古地理环境有密切的关系。在内陆环境或滨海三角洲平原环境下形成的和在海洋相交替沉积的煤层或浅海相沉积的煤层，煤中的硫含量就比较高，且大部分为有机硫。根据煤中硫的存在形态，一般分为有机硫和无机硫两大类。各种形态的硫分的总和称为全硫分。所谓有机硫，是指与煤的有机结构相结合的硫。有机硫主要来自成煤植物中的蛋白质和微生物的蛋白质。无机硫主要来自矿物质中各种含硫化合物，一般又分为硫化物硫和硫酸盐硫两种，有时也有微量的单质硫。硫化物硫主要以黄铁矿为主，其次为白铁矿、磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )、闪锌矿( $\text{ZnS}$ )、方铅矿( $\text{PbS}$ )等。硫酸盐硫主要以石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot$

2H<sub>2</sub>O) 为主，也有少量的绿矾 (FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O) 等。

发电厂煤质化验分析的一般步骤：采样—破碎—干燥—制样—实验分析，化验流程如图 1-1 所示。

煤的元素分析是对煤中的元素含量进行检测和分析（一般用质量百分数表示），包括常规的 C、H、O、N、S、Al、Si、Fe、Ca 等元素质量百分比含量，还可检测煤中的微量元素包括 Ti、Na、K 等。根据使用目的不同，元素分析又可分为应用基（收到基 W<sub>y</sub>）、分析基（空干基 W<sub>f</sub>）、干燥基、可燃基（干燥无灰基）。而工业分析可得到煤中水分、挥发分、固定碳、灰分质量百分比含量以及煤的发热量。煤的元素分析（各基准）和工业分析的对应关系如图 1-2 所示。

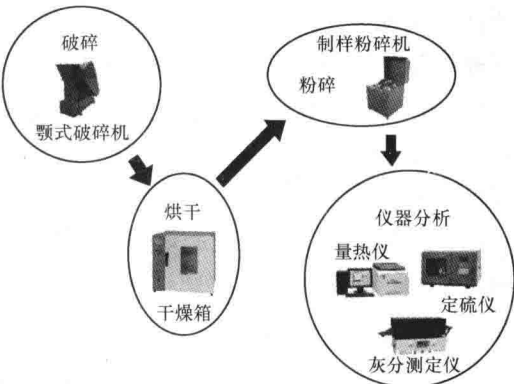


图 1-1 发电厂煤质化验流程

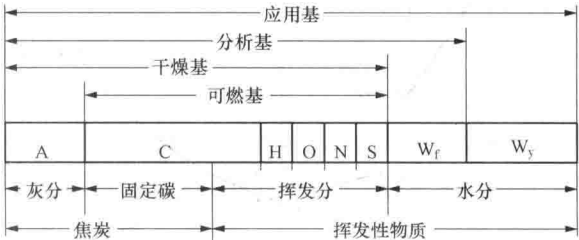


图 1-2 煤的元素分析（各基准）和工业分析的对应关系

烟煤比较复杂，按挥发分分为 4 个档次，即 V<sub>daf</sub> 为 10%~20%、20%~28%、28%~37% 和 37% 以上，分为低、中、中高和高四种挥发分烟煤。按黏结性可以分为 5 个或 6 个档次，即 GR.I.（烟煤黏结指数）为 0~5，称为不黏结或弱黏结煤；GR.I. 为 5~20，称弱黏结煤；GR.I. 为 20~50，称为中等偏弱黏结煤；GR.I. 为 50~65，称为中等偏强黏结煤；GR.I. 大于 65，称为强黏结煤。各类煤的基本特征如下：

(1) 无烟煤 (WY)。无烟煤固定碳含量高，挥发分产率低，密度大，硬度大，燃点高，燃烧时不冒烟。

(2) 贫煤 (PM)。贫煤是煤化度最高的一种烟煤，不黏结或微具黏结性。在层状炼焦炉中不结焦。燃烧时火焰短，耐烧。

(3) 贫瘦煤 (PS)。贫瘦煤是高变质、低挥发分、弱黏结性的一种烟煤。结焦较典型瘦煤差，单独炼焦时，生成的焦粉较多。

(4) 瘦煤 (SM)。瘦煤是低挥发分的中等黏结性的炼焦用煤。在炼焦时能产生一定量的胶质体。单独炼焦时，能得到块度大、裂纹少、抗碎性较好的焦炭，但焦炭的耐磨性较差。

(5) 焦煤 (JM)。焦煤是中等及低挥发分的中等黏结性及强黏结性的一种烟煤。加

热时能产生热稳定性很高的胶质体。单独炼焦时能得到块度大、裂纹少、抗碎强度高的焦炭，其耐磨性也好。但单独炼焦时，产生的膨胀压力大，使推焦困难。

(6) 肥煤 (FM)。肥煤是低、中、高挥发分的强黏结性烟煤。加热时能产生大量的胶质体。单独炼焦时能生成熔融性好、强度较高的焦炭，其耐磨性有的也较焦煤焦炭为优。缺点是单独炼出的焦炭，横裂纹较多，焦根部分常有蜂焦。

(7) 1/3 焦煤 (1/3JM)。1/3 焦煤是新煤种，它是中高挥发分、强黏结性的一种烟煤，又是介于焦煤、肥煤、气煤三者之间的过渡煤。单独炼焦能生成熔融性较好、强度较高的焦炭。

(8) 气肥煤 (QF)。气肥煤是一种挥发分和胶质层都很高的强黏结性肥煤类，有的称为液肥煤。炼焦性能介于肥煤和气煤之间，单独炼焦时能产生大量的气体和液体化学产品。

(9) 气煤 (QM)。气煤是一种煤化度较浅的炼焦用煤。加热时能产生较高的挥发分和较多的焦油。胶质体的热稳定性低于肥煤，能够单独炼焦。但焦炭多呈细长条而易碎，有较多的纵裂纹，因而焦炭的抗碎强度和耐磨强度均较其他炼焦煤差。

(10) 1/2 中黏煤 (1/2ZN)。1/2 中黏煤是一种中等黏结性的中高挥发分烟煤。其中有一部分在单独炼焦时能形成一定强度的焦炭，可作为炼焦配煤的原料。黏结性较差的一部分煤在单独炼焦时，形成的焦炭强度差，粉焦率高。

(11) 弱黏煤 (RN)。弱黏煤是一种黏结性较弱的从低变质到中等变质程度的烟煤。加热时，产生较少的胶质体。单独炼焦时，有的能结成强度很差的小焦块，有的则只有少部分凝结成碎焦屑，粉焦率很高。

(12) 不黏煤 (BN)。不黏煤是一种在成煤初期已经受到相当氧化作用的低变质程度到中等变质程度的烟煤。加热时，基本上不产生胶质体。煤的水分大，有的还含有一定的次生腐植酸，含氧量较多，有的高达 10% 以上。

(13) 长焰煤 (CY)。长焰煤是变质程度最低的一种烟煤，从无黏结性到弱黏结性的都有。其中最年轻的还含有一定数量的腐植酸。贮存时易风化碎裂。煤化度较高的年老煤，加热时能产生一定量的胶质体。单独炼焦时也能结成细小的长条形焦炭，但强度极差，粉焦率很高。

(14) 褐煤 (HM)。褐煤分为透光率  $P_m < 30\%$  的年轻褐煤和  $P_m$  为  $30\% \sim 50\%$  的年老褐煤两小类。褐煤的特点：含水分大，密度较小，无黏结性，并含有不同数量的腐植酸，煤中氧含量高，常达  $15\% \sim 30\%$ 。化学反应性强，热稳定性差，块煤加热时破碎严重。存放空气中易风化变质、破碎成小块甚至粉末状。发热量低，煤灰熔点也低，其灰中含有较多的  $\text{CaO}$ ，而有较少的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。

## 第二节 煤燃烧过程中污染物的形成

高耗低效的燃煤方式是造成煤烟型大气污染的主要原因。燃煤造成的污染占我国烟尘排放的 70%、 $\text{SO}_2$  排放的 85%、 $\text{NO}_x$  排放的 67% 以及  $\text{CO}_2$  排放的 80%。

## 一、煤燃烧过程中环境污染物的形成过程

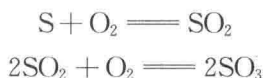
煤粉燃烧过程是一个以煤的热解、挥发分燃烧、焦炭燃烧为主复合而成的复杂化学反应过程。

### 1. 二氧化硫、三氧化硫的形成过程

硫在煤中以无机硫和有机硫两种形态存在。无机硫包括元素硫、硫化物硫和硫酸盐硫。元素硫、硫化物硫和有机硫为可燃性硫（为 80%~90%），硫酸盐硫是非可燃性硫，不参与燃烧反应，多残存于灰烬中。

可燃性硫在煤炭燃烧时生成二氧化硫，其中 1%~5% 氧化为  $\text{SO}_3$ ，其主要化学反应式如下。

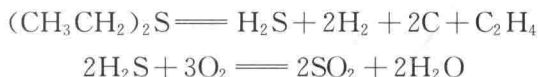
单体硫燃烧：



硫铁矿的燃烧：



硫醚等有机硫燃烧：

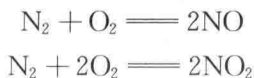


### 2. 氮氧化物的形成过程

火力发电机组按照常规燃烧方式产生的氮氧化物主要包括：一氧化氮、二氧化氮以及少量氧化二氮，其中一氧化氮占 90% 以上，二氧化氮占 5% 左右，氧化二氮占 1% 左右。

煤炭燃烧产生氮氧化物的机理主要有三个方面：

(1) 热力型氮氧化物（约占氮氧化物总生成量的 20%）。煤燃烧所用空气中的氮气和氧气在高温条件下反应生成氮氧化物。氮气浓度、氧气浓度、停留时间、温度是影响热力型氮氧化物生成的主要因素。其化学反应式如下：



(2) 燃料型氮氧化物（占氮氧化物总生成量的 60%~80%）。煤中所含的氮元素在燃烧过程中被氧化为氮氧化物。氧气浓度、反应时间、煤中氮元素的含量是影响燃料型氮氧化物生成的主要因素。

(3) 快速型氮氧化物（约占氮氧化物总生成量的 5% 以下）。火焰边缘的分子氮在碳氢化合物的参与影响下，通过中间产物转化成氮氧化物。氧气浓度、过剩空气量是影响快速型氮氧化物生成的主要因素。

### 3. 烟尘的形成过程

煤在燃烧过程中会产生烟尘。

烟尘是煤燃烧产生的颗粒物，它包括黑烟和飞灰两部分。黑烟主要是未燃尽的碳粒，飞灰主要是煤中所含的不可燃矿物质微粒，是灰分的一部分。

#### 4. 汞的形成过程

汞在煤中一般以汞单质和二价汞化合物的形式存在。当煤炭燃烧的时候,汞转化为气相,进入烟气。

### 二、污染物的生成特性

#### 1. 煤炭燃烧过程中二氧化硫的生成特性

- (1) 煤中的含硫量越高,燃烧时二氧化硫的浓度越高。
- (2) 高挥发分煤中硫的析出速度比低挥发分煤中硫的析出速度快。
- (3) 煤粉粒径增加,硫析出时间变长,二氧化硫生成量减少。
- (4) 增加过量空气系数,可加快硫的析出,二氧化硫浓度较高。
- (5) 煤中硫的总体析出时间随着燃烧时氧浓度的增加而缩短。
- (6) 二次风比例增加,二氧化硫浓度增大。
- (7) 一氧化碳的存在可以使二氧化硫的析出速率、析出量降低。
- (8) 煤中硫的析出时间随温度的升高而缩短,最终析出量随温度的升高而增加。

#### 2. 煤炭燃烧过程中氮氧化物的生成特性

- (1) 煤粉燃烧过程中氮的析出可分为前期快速生成和后期缓慢释放两个阶段。
- (2) 氮氧化物主要在煤粉着火过程中产生,煤中含氮量越高,NO 浓度越高。
- (3) 在含氮量相同时,挥发分含量越大,一氧化氮排放浓度越高。
- (4) 煤中氧氮比越大,氮析出速率越高,氮析出量也越多。
- (5) 煤粉越细,一氧化氮转化率越小,细煤粉可达到较低的 NO 排放浓度。
- (6) 煤的湿度增加,可降低一氧化氮的排放量。
- (7) 过量空气系数增加,一氧化氮生成量增加。
- (8) 一、二次风比例变化对一氧化氮的生成影响非常明显,加入贴壁风可使一氧化氮浓度降低。
- (9) 一氧化碳对一氧化氮具有还原作用,可以使一氧化氮的生成减少。
- (10) 燃料氮的析出具有中温生成特性,在  $700\sim 800^{\circ}\text{C}$  时氮的析出量最大。
- (11) 二氧化氮的生成量与燃烧温度及其前驱物一氧化氮的浓度密切相关,温度升高时,二氧化氮大量分解。
- (12) 当一氧化氮浓度增加时,NO<sub>2</sub> 的浓度相应增大。
- (13) 循环流化床锅炉燃烧温度较低 ( $850\sim 900^{\circ}\text{C}$ ),热力型 NO<sub>x</sub> 的生成量比煤粉炉少。

(14) 直流燃烧器、燃烧贫煤的四角切圆燃烧锅炉,为了燃烧充分,锅炉设计采用的过量空气系数、截面热强度和容积热强度较高,燃烧区域的燃烧温度也比较高,因此 NO<sub>x</sub> 生成量也较高。

#### 3. 煤炭燃烧过程中烟尘的生成特性

- (1) 煤中的灰分越高、含水量越少,燃烧时烟尘的浓度越高。
- (2) 碳离子燃尽的时间与离子的初始直径、离子的表面温度、氧气浓度、停留时间有关,若不能够燃尽则会冒黑烟。

(3) 煤粉的粒度越细, 烟尘的粒径分布也越细。

(4) 烟尘的生成量随火焰压力的增加而增加。

#### 4. 煤炭燃烧过程中汞的生成特性

(1) 煤燃烧过程中生成的元素汞会以氧化态汞、零价汞、颗粒汞的形态出现。

(2) 烟气中的氯元素可以提高烟气中可溶性二价汞的含量。

(3) 飞灰颗粒的大小对汞的富集能力影响较大, 小颗粒对汞的富集作用更强。

(4) 飞灰中的残炭可以增强飞灰对气态汞的吸附作用。

## 第二章

# 烟气自动监控系统 (CEMS)

自动监控系统 (Continuous Emission Monitoring System, CEMS), 是指对大气污染源排放的气态污染物和颗粒物进行浓度和排放总量连续监测, 并将信息实时传输到主管部门的装置。

《煤电节能减排升级与改造行动计划 (2014—2020 年)》(发改能源〔2014〕2093 号) 发布后, 全国燃煤发电机组大气污染物排放浓度被要求在 2020 年之前实现燃气机组排放限值要求, 即在基准含氧量 6% 条件下, 烟尘、二氧化硫、氮氧化物排放浓度分别不高于 10、35、50mg/m<sup>3</sup>, 这对烟气自动监测系统的精确性提出了更高要求, 已有大量机组进行了超低排放改造。火电厂在烟气自动监控系统的资金投入比重也在逐年加大。

## 第一节 CEMS 的作用

### 一、标准中关于 CEMS 的要求

依据 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》的规定, 新建企业和现有企业安装污染物排放自动监控设备的要求, 应按有关法律和《污染源自动监控管理办法》的规定执行。

自动监控系统由自动监控设备和监控中心组成。自动监控设备是指在污染源现场安装的用于监控、监测污染物排放的仪器、流量 (速) 计、污染治理设施运行记录仪和数据采集传输仪等仪器、仪表, 是污染防治设施的组成部分。监控中心是指环境保护部门通过通信传输线路与自动监控设备连接用于对重点污染源实施自动监控的计算机软件和设备等。

### 二、CEMS 测量的烟气参数分类

火电厂测量的常规烟气参数有烟尘、O<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO、NH<sub>3</sub>、CO、湿度、温度、压力、流速、流量。依据 HJ 75—2007《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》的规定, 固定污染源烟气 CEMS 由颗粒物监测子系统、气态污染物监测子系统、烟气排放参数测量子系统、数据采集、传输与处理子系统等组成。通过采样和非采样方式, 测定