



湿法烟气脱硫系统的 安全性及优化

曾庭华 杨 华 马 斌 王 力 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

湿法烟气脱硫系统的 安全性及优化

曾庭华 杨 华 马 斌 王 力 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

2021



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

0226/04



本书在国内首次全面、系统地阐述了火电厂烟气脱硫 (FGD) 系统对发电机组的综合影响, 包括 FGD 系统运行对锅炉运行的影响、对汽轮机运行的影响、对锅炉尾部烟道及烟囱的影响、石膏浆液与灰渣水混合排放对机组灰渣排放系统运行的影响等。作者对湿法 FGD 系统内的腐蚀环境和防腐措施进行了细致的分析, 提出了 FGD 系统的腐蚀性指数 K_c 的概念, 提出了 FGD 系统的安全性概念, 即对发电机组安全性的影响及 FGD 系统本身的安全性, 并结合 FGD 系统实际运行经验, 详细阐述了其含义。也提出了 FGD 系统优化的概念, 同时进行了详尽的探讨, 包括 FGD 系统工艺的优化选择, 选定 FGD 系统的工艺设计、运行优化及 FGD 系统的国产化等三方面的内容。书中还介绍了我国 SO_2 的排放状况和控制历程、国内外火电厂最新的 FGD 技术以及 FGD 系统的调试、运行技术等。全书内容丰富、新颖, 图文并茂, 密切联系工程实际, 对于 FGD 系统设计、设备选型、运行、调试等各方面都有很好的参考价值。

本书可供从事火电厂烟气脱硫技术的研究、设计、调试、试验、运行和管理人员参考, 也可作为高等院校有关专业的研究生、大学生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

湿法烟气脱硫系统的安全性及优化/曾庭华等著.
北京: 中国电力出版社, 2003
ISBN 7-5083-1794-7

I. 湿... II. 曾... III. 湿法-烟气脱硫-研究
IV. X701.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 098151 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 1 月第一版 2004 年 1 月北京第一次印刷


787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 26.75 印张 609 千字 21 插页

印数 0001—3000 册 定价 68.00 元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前言



中国能源资源以煤炭为主。在电源结构方面，今后相当长的时间内以燃煤发电机组为主的基本格局不会改变，由此造成了严重的环境污染，特别是 SO_2 即酸雨的污染。多年来，我国 SO_2 的排放量都在 2000 万 t 上下，排在世界第一位。近年来，随着国民经济的发展和人民生活水平的提高，我国开始加速对环境污染的治理。2002 年 11 月，国务院批复了国家环保总局与有关部门共同编制的《“两控区”酸雨和二氧化硫污染防治“十五”计划》，根据计划安排，“到 2005 年，‘两控区’内火电厂 SO_2 排放量在 2000 年的基础上削减 20%……”。为实现上述目标，“十五”期间，我国用于酸雨和二氧化硫污染防治的资金将达 967 亿元。2003 年 1 月 1 日，我国的《洁净生产促进法》开始实施，削减 SO_2 排放是电力行业推行洁净生产的重点，也是社会关注的焦点，许多地区已开始或即将实施脱硫计划。以广东省为例，2002 年 10 月，广东省粤电资产经营有限公司推出“粤电公司蓝天工程计划”，公司将投入 55 亿多元人民币，用于所属 9 个火电厂在运 28 台机组的脱硫工程。2002 年 11 月，为摘掉“重点排硫区黑帽”，广东省环保局决定对火电厂脱硫实施“八年三步走”计划等。可以预见，未来的几年将是我国烟气脱硫技术飞速发展和应用的一个重要时期。

火电厂采用烟气脱硫 (FGD) 技术无疑是减少 SO_2 排放的一个有效措施，但目前人们关心较多的是系统的脱硫率、系统的初投资及运行费用等，而在 FGD 系统对电厂发电机组的正常运行会产生怎样的影响、FGD 系统本身的安全性如何、如何进行 FGD 系统的优化等方面，很少见到系统的研究报道，这些问题直接关系到 FGD 系统的投资及运行维护费用、系统的投用率、寿命及机组的安全运行等，必须予以关注。

迄今为止，国内外已开发出数百种 FGD 技术，其中石灰石/石膏湿法技术最为成熟，占世界上投入运行的 FGD 系统的 85% 左右，我国的大型发电机组烟气脱硫也以石灰石/石膏湿法为主。本书就是以石灰石/石膏湿法为主要对象，结合具体的工程实际，在参阅了大量文献资料的基础上撰写而成的。

本书共分 8 章，第 1 章介绍了我国 SO_2 的排放状况和控制历程。第 2 章介绍了国内外火电厂主要的烟气脱硫技术，突出了一个“新”字，例如 CT-121 技术、RCFB、NID、GSA 等 FGD 技术，都是近几年才在国内得到应用的，其他书藉中介绍得较少。第 3 章详细介绍了安装在连州电厂的广东省第一套石灰石/石膏湿法 FGD 系统，包括其系统设计、调试及性能试验。第 4 章全面、系统地研究了 FGD 对发电机组的影响，包括对锅炉、汽轮机、灰渣排放系统、尾部烟道和烟囱、工业水系统、厂用电系统等的影响。其中对脱硫石膏与机组灰渣水混排进行了现场研究，并在国内首次成功应用，还提出了 FGD 系统的腐蚀性

指数 K_s 的概念, 用它取代原有的烟气腐蚀性指数 K_c 来判断脱硫后烟气的腐蚀性强弱等。第 5 章分析了湿法 FGD 系统内的腐蚀环境, 介绍了各种防腐材料, 并举了大量实际 FGD 工程的具体防腐措施。第 6 章提出了 FGD 系统的安全性概念, 即对发电机组安全性的影响程度及 FGD 系统本身的安全程度, 并结合 FGD 系统实际运行经验, 详细阐述了其含义。第 7 章提出了 FGD 系统优化的概念, 包括 FGD 系统工艺的优化选择, 选定 FGD 系统的工艺设计、运行优化及 FGD 系统的国产化等三方面的内容, 并进行了详尽的分析。第 8 章提出了基于 FGD 系统安全性的评价体系, 并以连州电厂及广东省各 FGD 系统为例进行了评价。书名《湿法烟气脱硫系统的安全性及优化》虽不能反映全书的所有内容, 但 FGD 系统的安全性及优化是本书的核心部分, 是创新之处, 最能反映作者的意图。全书较少介绍理论, 代之以大量的工程实例图片及数据, 因而实用性很强, 对消化吸收国外先进的湿法 FGD 技术、湿法 FGD 系统的设计、设备选型及调试、运行都有很好的参考价值。

本书撰写过程中, 得到了广东省电力集团公司的许多领导, 广东省电力试验研究所领导、锅炉室主任罗萌、廖永进等各位同事们及环化室、热工室、电气室等同事的大力支持和帮助。粤连公司领导李光亮、梁云腾、侯维平、刘永新, 监理周鹏飞先生及 AE 公司的练强飞先生、Roman 先生、Dully 先生等, 连州电厂李焕辉、杨建球、莫钰英、刘英炎等领导 and 所有运行人员, 在 FGD 系统调试和试验中给予了很好的协作; 广东省电力设计院的金晶主任、高级工程师张羽、浙江省电力设计院高级工程师赵金龙、浙江大学高翔教授等为本书提供了许多很好的资料和建议, 粤电资产经营公司方江涛、孙丹萍、杨洁、黄国清、袁永权等同志给予了许多的帮助, 作者在此对他们表示诚挚的谢意! 作者还要感谢四川珞璜电厂、重庆电厂、成都热电厂、内江电厂、西南电力设计院、四川省电力试验研究所、浙江半山电厂、钱清电厂、杭州热电厂、浙江省电力试验研究所、浙江省电力设计院、山西太原第一热电厂、沙角 A 电厂、沙角 C 电厂、深圳妈湾电厂、广州恒运电厂、广州造纸厂、广州石化热电分厂、台山电厂等单位的同仁给予的帮助。对我所情报室罗海主任及中国电力出版社编辑们的热心指导也深表谢意!

由于作者初次作著, 经验不足, 加之水平有限, 书中的缺点和错误之处, 敬请各位专家和读者批评指正。

我们希望通过本书的出版, 能为我国火电厂烟气脱硫事业的发展做出自己最大的贡献!

作者

2003 年 8 月于广州

目 录

前言

第1章 我国 SO₂ 的排放现状与控制	1
1 SO ₂ 的危害及我国 SO ₂ 的排放现状	1
2 我国 SO ₂ 排放的控制历程	11
3 我国 SO ₂ 控制技术的研究、开发及应用	22

第2章 火电厂 FGD 技术概述	31
1 FGD 技术的分类	31
2 湿法 FGD 技术	33
3 干法、半干法 FGD 技术	87
4 国外 FGD 技术的发展和现状	119

第3章 FGD 系统概述	124
1 机组简介	124
2 FGD 系统	124
3 FGD 系统的调试简介	138
4 FGD 系统的性能试验简介	153

第4章 FGD 系统对发电机组的影响	155
1 FGD 系统对锅炉运行的影响	155
2 FGD 系统对汽轮机系统运行的影响	165
3 FGD 系统对灰渣排放系统运行的影响	177
4 FGD 系统对尾部烟道及烟囱的影响	184
5 FGD 系统对工业水系统运行的影响	191
6 FGD 系统的用电	193
7 FGD 系统投运时机组的最优运行程序	197

第5章 FGD 系统内的腐蚀环境和防腐措施	200
1 湿法 FGD 系统内的腐蚀机理和腐蚀环境	200
2 FGD 系统的防腐材料	205
3 FGD 系统中的防腐措施	240

4 防腐材料的国产化	248
<hr/>	
第6章 FGD系统的安全性探讨	254
1 FGD系统的安全性定义	254
2 湿法石灰石/石膏 FGD系统对发电机组安全性的影响	254
3 湿法石灰石/石膏 FGD系统本身的安全性	256
4 干法、半干法 FGD系统的安全性初探	267
<hr/>	
第7章 FGD系统的优化	273
1 FGD系统优化的概念	273
2 湿法 FGD系统的优化经验	286
3 连州电厂 FGD装置的优化改进	347
4 FGD技术的国产化	353
<hr/>	
第8章 FGD系统的综合评价	367
1 FGD系统的评价方法	367
2 连州电厂 FGD系统的综合评价	369
3 广东省火电厂现有 FGD技术的综合评价	378
<hr/>	
附录1 国务院关于酸雨控制区和二氧化硫污染控制区有关问题的批复	386
附录2 《燃煤二氧化硫排放污染防治技术政策》	389
附录3 世界上典型国家火电 SO ₂ 排放的控制	393
附录4 连州电厂 FGD系统的联锁与保护	405
附录5 连州电厂 FGD系统在 CRT上的程控操作步骤	410
<hr/>	
主要参考文献	416

1 SO₂的危害及我国SO₂的排放现状1.1 SO₂的危害

SO₂是当今人类面临的主要大气污染物之一，其污染源分为两大类：天然污染源和人为污染源。这两种污染源的特点如表1-1所示。天然污染源由于量少、面广、易稀释和净化，对环境的危害不大；而人为污染源由于量大、集中、浓度高，对环境造成严重的危害。

表1-1 SO₂天然污染源和人为污染源特点比较

SO ₂ 污染源	发 生 源	特 性 及 影 响	排 放 比 例
天然污染源	1) 海洋硫酸盐盐雾 2) 缺少氧化的水和土壤释放的硫酸盐 3) 细菌分解的有机化合物 4) 火山爆发 5) 森林失火等	1) 全球性分布，在广阔地区以低浓度排放，在大气中易于稀释和被净化 2) 一般不会产生酸雨现象 3) 人力无法控制	1/3
人为污染源	1) 化石燃料燃烧，占3/4以上 2) 金属冶炼 3) 石油生产 4) 化工生产 5) 采矿等	1) 比较集中，在占地球表面不到1%的城市和工业区上空占主导地位 2) 是发生酸雨的基本原因 3) 人力可以控制	2/3

SO₂的污染属于低浓度、长期的污染，它的存在对自然生态环境、人类健康、工农业生产、建筑物及材料等方面都造成了一定程度的危害。

空气中不同浓度的SO₂对人体的影响列于表1-2中。SO₂对人体健康的影响主要是通过呼吸道系统进入人体，与呼吸器官作用，引起或加重呼吸器官的疾病，如鼻炎、咽喉炎、支气管炎、支气管哮喘、肺气肿、肺癌等。据北京、上海、天津、沈阳、太原等地的调查表明，这些城市重污染区内居民的慢性支气管炎、鼻炎、鼻咽炎患病率比轻污染区和对照区高0.5~1倍，个别城市甚至高2~3倍。沈阳和青岛流行病学研究表明：居住在重污染区内儿童的呼吸道阻力明显高于清洁区内的儿童，并发现气道阻力与大气中SO₂浓度呈正相关，相关系数 $r=0.9996$ ；居住在重污染区儿童的肺功能中期流速均值明显低于居住在清洁区内的儿童。研究表明，生活在重污染区内儿童的嗅阈迟钝者（嗅阈三级）约占18%，清洁区仅为5%。反之，重污染区嗅阈灵敏的（嗅阈一级）仅占37%，而清洁区占46%。研究还表明，大气中SO₂的浓度每年增加10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，呼吸系统疾病的死亡人数将增



加 5%。

表 1-2 空气中不同体积分数的 SO₂ 对人体的影响

体积分数 ($\times 10^{-6}$)	对人体的影响	体积分数 ($\times 10^{-6}$)	对人体的影响
0.01 ~ 0.1	由于光化学反应生成分散性颗粒, 引起视野距离缩小	10.0 ~ 100.0	对动物进行试验时出现种种症状
0.1 ~ 1.0	植物及建筑结构材料遭受损害	20.0	人因受到刺激而引起咳嗽、流泪
1.0 ~ 10.0	对人有刺激作用	100.0	人仅能忍受短时间的操作, 咽喉有异常感, 喷嚏、疼痛、哑嗓、咳嗽、胸痛, 并且呼吸困难
1.0 ~ 5.0	感觉到 SO ₂ 气体		
5.0 ~ 10.0	人在此环境下进行较长时间的操作尚能忍受	400 ~ 500	立刻引起人严重中毒, 呼吸道闭塞而致窒息死亡

SO₂ 往往被飘尘吸附, SO₂ 和飘尘的协同效应使其对人体的危害更大。吸附 SO₂ 的飘尘可将 SO₂ 带入人的肺部, 使其毒性增加 3~4 倍。在光照下, 飘尘中的 Fe₂O₃ 等物质可将 SO₂ 催化转化成 SO₃, 遇水可形成硫酸雾并被飘尘吸附。此飘尘经呼吸道吸入肺部, 滞留在肺壁上, 可引起肺纤维性病变和肺气肿, 硫酸雾的刺激作用比 SO₂ 强 10 倍。历史上与 SO₂ 污染有关的污染事故如表 1-3 所示。

表 1-3 历史上与 SO₂ 污染有关事故

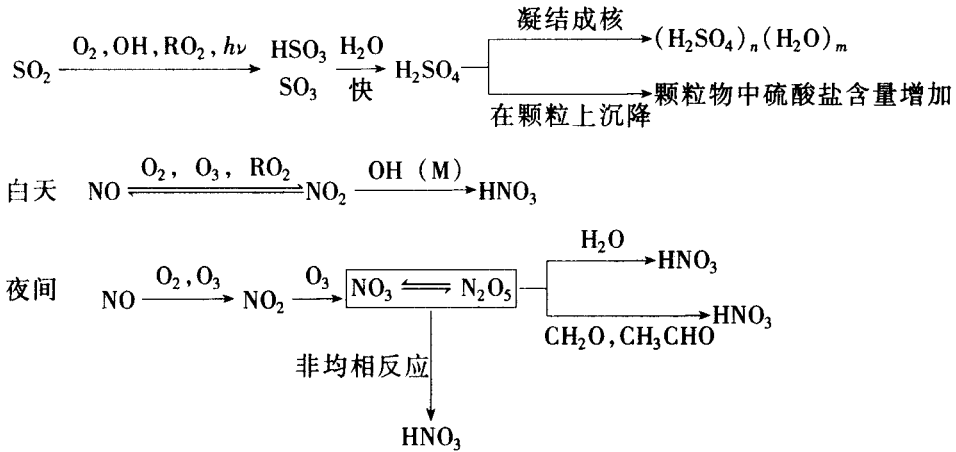
时 间	地 点	简 况	后 果
1930 年 12 月 1~5 日	马斯河谷 (比利时)	烟尘和 SO ₂ , 一周内平均死亡率剧增	6000 多人发病, 60 多人死亡
1948 年 10 月 27~31 日	多倍拉(美)	烟尘和 SO ₂ , 大雾看不见人	5911 人发病, 占全镇总人口 43%, 死亡 17 人
1949 年	伦敦(英)	烟尘和 SO ₂ , 一周内因支气管炎死亡的人数增多	较上周多死亡 75 人
1952 年 12 月 5~9 日	伦敦(英)	烟尘和 SO ₂ , 逆温层, 无风, 大雾	4 天内死亡 4000 人, 2 个月死亡 8000 人
1956 年 1 月 3~6 日	伦敦(英)	烟尘和 SO ₂	约 1000 人死亡
1957 年 12 月 2~5 日	伦敦(英)	烟尘和 SO ₂	死亡 400 多人
1961 年	四日市(日)	烟尘和 SO ₂ , 著名的“四日市哮喘病”	患者 800 多人, 死亡 10 人
1960 年 12 月 5~6 日	伦敦(英)	烟尘和 SO ₂	死亡 750 人
1970 年	东京(日)	光化学烟雾加 SO ₂ , 无风	受害者近万人

SO₂ 对植物的危害主要是通过叶面气孔进入植物体, 在细胞或细胞液中生成 SO₃²⁻ 或 HSO₃⁻ 和 H⁺。如果其浓度和持续时间超过本身的自解机能, 就会破坏植物正常的生理机能, 使其生长缓慢, 对病虫害的抵抗力降低, 严重时会使枯死。资料表明, 当 SO₂ 浓度年均达到 (0.01~0.08) $\times 10^{-6}$ 时, 许多植物就开始受到不同程度的伤害, 有些植物在更低的

浓度下便遭损害。

SO₂ 给人类带来最严重的问题是酸雨，这是全球性的问题。大气中 SO₂、NO_x 与氧化性物质 O₃、H₂O₂ 和其他自由基进行化学反应生成硫酸和硝酸，最终形成 pH 值小于 5.6 的酸性降雨（即酸雨）返回地面，它们约占酸雨总量的 90% 以上。由于过程复杂，酸雨的形成可简化如下：

均相反应：



酸雨对环境的危害更大，最为突出的是它会使湖泊变成酸性，导致水生生物死亡。酸性湖水或河水会降低水中含钙量，损坏鱼的脊椎和骨骼，使鱼畸形，造成驼背或缩短。此外，酸性水还会使河底沉积物释放出有毒物质，如铅、镉、镍等。当湖水或河水的 pH 值小于 5.5 时，大部分鱼类很难生存；当 pH 值小于 4.5 时，各种鱼类、两栖动物和大部分昆虫消失，水草死亡。酸雨还浸渍土壤，侵蚀矿物，使铝元素和重金属元素沿着基岩裂缝流入附近水体，影响水生生物生长或使其死亡。

酸雨对生态系统的影响及破坏主要表现在使土壤酸化和贫瘠化，农作物及森林生长减缓，湖水酸化，鱼类生长受到抑制，对建筑物和材料有腐蚀作用，加速风化过程等方面。例如，1982 年夏季，重庆连降酸雨，6 月 18 日夜一场酸雨过后，1300 多公顷水稻叶片突然枯黄，犹如火烤，纷纷枯死，重庆南山马尾松死亡率达 46%，四川峨眉山金顶的冷杉已有 40% 死亡。

酸雨还加速了许多用于建筑结构、桥梁、水坝、工业装备、供水管网、地下储罐、水轮发电机组、动力和通信设备等材料的腐蚀，对文物古迹、历史建筑、雕刻等重要文物设施造成严重损害。另外酸雨对人体健康也产生间接的影响，酸雨使地面水呈酸性，地下水中的金属含量也增高，饮用这种水或食用酸性河水中的鱼类会对人体健康产生危害，同样也会波及到野生动物。

1.2 我国的 SO₂ 排放及酸雨污染现状

1.2.1 电力发展与 SO₂ 排放

SO₂ 的主要人为来源与能源消耗有关，而经济发展离不开能源的支持。我国是一个能源生产和消费大国，一次能源消费总量仅次于美国，居世界第二位，但人均消费量还不到

全世界人均的一半，不足美国人均的 1/10。目前我国能源短缺仍然是制约经济发展的重要因素，表 1-4 是我国与部分国家人均电力指标比较。由表 1-4 可见，中国人均电力指标在这些世界主要国家中排末位。

表 1-4 我国与部分国家人均电力指标比较

地区 \ 项目	人均装机容量 (kW/人)	人均发电量 (kW·h/人)	人均用电量 (kW·h/人)	统计年份
中国	0.265	1162.7	1150	2001
美国	3.10	13198	12434	1997
俄罗斯	1.46	5671	4963	1997
英国	1.22	5852	5380	1997
西班牙	1.23	4800	4104	1997

改革开放以来，随着经济的发展，我国的电力工业持续、稳定地增长。1980 年我国人均装机为 0.067kW，人均发电量 304.5 kW·h，人均生活用电量 10.6 kW·h。2001 年，我国人均装机为 0.265kW，人均发电量 1162.7 kW·h，人均生活用电量 144.1 kW·h，分别比 1980 年增长了 4.0 倍、3.8 倍和 13.6 倍。表 1-5 显示了我国 1980~2001 年装机容量、发电量及发电能源构成的变化情况，表 1-6 是我国历年人均电力指标。

表 1-5 我国 1980~2001 年装机容量、发电量及发电能源构成的变化

年 份	装机容量 (万 kW)				发电量 (亿 kW·h)				发电能源构成 (%)		
	水电	火电	核电	总计	水电	火电	核电	总计	水电	火电	核电
1980	2032	4555	—	6587	582.11	2424.16	—	3006.27	19.36	79.64	—
1981	2193	4720	—	6913	655.46	2437.23	—	3092.69	21.19	78.81	—
1982	2296	4940	—	7236	743.99	2532.79	—	3276.78	22.70	77.30	—
1983	2416	5228	—	7644	863.57	2650.82	—	3514.39	24.57	75.43	—
1984	2560	5452	—	8012	867.84	2902.07	—	3769.91	23.02	76.98	—
1985	2641	6064	—	8705	923.74	3183.15	—	4106.89	22.49	77.51	—
1986	2754	6628	—	9382	944.80	3550.00	—	4495.71	21.02	78.96	—
1987	3019	7271	—	10290	1000.07	3927.60	—	4973.21	20.11	78.98	—
1988	3270	8280	—	11550	1091.50	4360.60	—	5450.65	20.00	80.00	—
1989	3458	9026	—	12664	1184.54	4662.21	—	5846.80	20.26	79.74	—
1990	3605	10184	—	13789	1263.50	4949.68	—	6213.18	20.34	79.66	—
1991	3788	11359	—	15147	1248.45	5526.49	—	6774.94	18.43	81.57	—
1992	4068	12585	—	16653	1314.66	6227.23	—	7541.89	17.43	82.57	—
1993	4459	13832	—	18291	1507.43	6831.96	24.90	8364.29	18.02	81.68	0.30
1994	4906	14874	210	19990	1667.86	7470.49	140.43	9278.78	17.97	80.51	1.52
1995	5218	16294	210	21722	1867.72	8073.43	128.33	10069.48	18.55	80.18	1.27
1996	5558	17886	210	23654	1869.18	8781.01	143.39	10793.58	17.32	81.35	1.33

续表

年 份	装机容量 (万 kW)				发电量 (亿 kW·h)				发电能源构成 (%)		
	水电	火电	核电	总计	水电	火电	核电	总计	水电	火电	核电
1997	5973	19241	210	25423	1945.71	9249.45	144.18	11342.04	17.15	81.55	1.30
1998	6507	20988	210	27729	2042.95	9388.12	141.01	11576.97	17.65	81.09	1.22
1999	7297	22343	210	29877	2129.27	10047.37	148.33	12331.41	17.17	81.48	1.20
2000	7935	23754	210	31932	2431.34	11079.36	167.37	13684.82	17.77	80.96	1.22
2001	8301	25314	246	33861	2611.08	12044.78	174.72	14838.56	17.60	81.17	1.18
2002	—	—	—	35300	2710.00	13420.00	250.00	16400.00	16.52	81.83	1.52

注 数据主要来源：中国电力报，2003年1月21日第3版，“全面小康社会电力需求将达到什么水平？”

表 1-6 我国历年人均电力指标

年 份	人均国民生产总值 (元/人)	人均装机容量 (kW/人)	年 份	人均国民生产总值 (元/人)	人均装机容量 (kW/人)
1980	452.9	0.0667	1991	1747.2	0.1308
1981	476.9	0.0691	1992	2051.3	0.1421
1982	510.9	0.0712	1993	2647.7	0.1534
1983	563.9	0.0742	1994	3654.6	0.1668
1984	667.1	0.0768	1995	4767.0	0.1793
1985	808.5	0.0822	1996	5539.3	0.1933
1986	901.9	0.0873	1997	6048.2	0.2057
1987	1033.9	0.0941	1998	6373.9	0.2222
1988	1267.1	0.1040	1999	6516.9	0.2373
1989	1419.1	0.1124	2000	7062.9	0.2523
1990	1547.7	0.1206	2001	7516.7	0.2653

我国全面小康社会的经济发展目标是，到2020年实现GDP比2000年翻两番，也即2001~2020年GDP年均增长速度达到7.2%左右，人均GDP到3200美元左右。根据原国家电力公司动力经济研究所的预测，我国全面实现小康社会的人均用电水平在3000kW·h左右，人均生活用电量在600kW·h左右。这样，在未来20年，我国电力需求增长需要持续保持较快的发展速度，预计为5.5%~6.0%左右。其中前10年增长速度预计为6.5%~7.0%左右，后10年预计为4.5%~5.0%。到2010年全社会用电将达到25400~26600亿kW·h，需要装机5.5~5.8亿kW；2020年全社会用电将达到39400~43200亿kW·h，需要装机8.2~9.0亿kW。这样2001~2010年年均净增电量1190~1310亿kW·h，年均需净装机2300~2600万kW；2010~2020年年均净增电量1400~1660亿kW·h，年均需净装机2600~3200万kW。相应地，2010年人均用电量将达1854~1942kW·h，人均生活用电量300~315kW·h；到2020年人均用电量将达2660~2920kW·h，人均生活用电量560~610kW·h。

又据国际能源署(IEA)2002年9月发布的一份《世界能源展望》报告显示，在2000

~2030年期间,中国的能源需求每年平均将增长2.7%,2030年将达到21.33亿t油当量,这一增长率高于其他国家和地区。中国在此30年期间对煤炭的需求每年将增长2.2%,在2030年达到20亿t。所增加需求的大多数将来自发电领域。IEA的报告称,中国的电力使用量在此期间每年将增长4.2%,电力在全部能源消费量中的比率将自2000年的16%增至2030年的26%。

在我国一次能源和发电能源构成中,煤占据了绝对的主导地位,这与多数工业发达国家的一次能源构成中以石油和天然气为主的特点大不相同。而且在已探明的一次能源储备中,煤炭仍是主要能源,在距地表1200m以内的保有储量就达10000多亿t,约占一次能源探明总储量的90%,估计煤炭资源总量为40000亿t;而石油资源为930亿t、天然气预计在 $(3.730 \sim 3.864) \times 10^{13} \text{m}^3$,水能为6.76亿kW。表1-7、表1-8为我国能源生产总量、消费总量及能源构成情况。有关专家预测,到2050年,煤在一次能源中所占比例仍在50%以上,这充分表明在很长的一段时间内,我国一次能源以煤为主的格局不会发生变化。

表 1-7 我国能源生产总量及构成

年 份	能源生产总量 (万t标准煤)	占能源生产总量的比重(%)			
		原 煤	原 油	天 然 气	水 电
1952	4871	96.7	1.3		2.0
1957	9861	94.9	2.1	0.1	2.9
1962	17185	91.4	4.8	0.9	2.9
1965	18824	88.0	8.6	0.8	2.6
1970	30990	81.6	14.1	1.2	3.1
1975	48754	70.6	22.6	2.4	4.4
1978	62770	70.3	23.7	2.9	3.1
1980	63735	69.4	23.8	3.0	3.8
1985	85546	72.8	20.9	2.0	4.3
1986	88124	72.4	21.2	2.1	4.3
1987	91266	72.6	21.0	2.0	4.4
1988	95801	73.1	20.4	2.0	4.5
1989	101639	74.1	19.3	2.0	4.6
1990	103922	74.2	19.0	2.0	4.8
1991	104844	74.1	19.2	2.0	4.7
1992	107256	74.3	18.9	2.0	4.8
1993	111059	74.0	18.7	2.0	5.3
1994	118729	74.6	17.6	1.9	5.9
1995	129034	75.3	16.6	1.9	6.2
1996	132616	75.2	17.0	2.0	5.8
1997	132410	74.1	17.3	2.1	6.5
1998	124250	71.9	18.5	2.5	7.1
1999	110000	68.2	20.9	3.1	7.8
2000	109000	67.2	21.4	3.4	8.0

表 1-8 我国能源消费总量及构成

年 份	能源消费总量 (万吨标准煤)	占能源消费总量的比重 (%)			
		原 煤	原 油	天 然 气	水 电
1956	8800	92.73	4.83	0.03	2.41
1957	9644	92.32	4.59	0.08	3.01
1958	17599	94.62	3.92	0.06	1.40
1959	23926	94.68	4.05	0.14	1.13
1960	30188	93.90	4.11	0.45	1.54
1961	20390	91.31	5.47	0.94	2.28
1962	16540	89.23	6.61	0.93	3.23
1963	15567	88.93	7.20	0.81	3.06
1964	16637	87.97	8.04	0.73	3.26
1965	18901	86.45	10.27	0.63	2.65
1966	20269	86.24	10.17	0.67	2.92
1967	18328	84.77	10.89	0.84	3.50
1968	18405	83.79	12.09	0.76	3.36
1969	22730	81.93	13.76	0.82	3.49
1970	29291	80.89	14.67	0.92	9.53
1971	37273	77.51	17.17	1.73	3.59
1973	39109	74.84	18.58	2.03	4.55
1974	40144	72.14	20.72	2.49	4.65
1975	45425	71.85	21.07	2.51	4.37
1976	47831	69.91	23.00	2.81	4.28
1977	52354	70.25	22.61	3.08	4.06
1978	57144	70.67	22.73	3.20	3.60
1980	60275	72.15	20.80	3.10	3.99
1981	59447	72.74	19.96	2.79	4.51
1982	62067	73.67	18.91	2.56	4.86
1983	66040	74.16	18.14	2.44	5.26
1984	70904	75.27	17.45	2.37	4.91
1985	76682	75.81	17.10	2.24	4.85
1986	80850	75.83	17.20	2.26	4.71
1987	86632	76.21	17.02	2.13	4.64
1988	92997	76.17	17.05	2.10	4.90
1989	96934	75.80	17.20	2.10	4.90
1990	98703	76.20	16.60	2.10	5.10
1991	103783	76.10	17.10	2.00	4.80

续表

年 份	能源消费总量 (万 t 标准煤)	占能源消费总量的比重 (%)			
		原 煤	原 油	天 然 气	水 电
1992	109170	75.70	17.50	1.90	4.90
1993	115993	74.70	18.20	1.90	5.20
1994	122737	75.00	17.40	1.90	5.70
1995	131176	74.60	17.50	1.80	6.10
1996	138811	75.00	17.50	1.60	5.90
1997	138173	71.50	20.4	1.7	6.2
1998	132214	69.60	21.5	2.2	6.7
1999	122000	67.10	23.4	2.8	6.7

注 1. 煤当量折算比率: 煤炭 0.714t/t, 石油 1.43 t/t, 天然气 1.33t/1000m³, 水电按当年火电煤耗计算。

2. 1994 ~ 1999 年水电包括核电。

煤炭是一种低品位的化石能源。我国煤炭中灰分、硫分含量高, 大部分煤的灰分在 25% ~ 28%, 硫分的含量变化范围较大, 从 0.1% ~ 10% 不等。我国多数煤种除长焰煤、气煤和不黏结煤外, 平均含硫率均超过 1.0%, 见表 1-9。我国 SO₂ 的排放量与煤炭消耗量有着密切的关系, 1983 ~ 1991 年两者的相关系数达到 0.96。由于具有以煤为主的一次能源构成, 以及煤的发热量低、含硫量高的特点, 我国 SO₂ 污染日益严重, 大量的燃煤和煤中较高的含硫量导致大量的 SO₂ 排放。《中国环境状况公报》表明, 1990 年, 我国大、中城市大气污染较重, 小城镇大气污染有加重的趋势。全国废气排放量 (不包括乡镇工业) 为 85000 亿 m³ (标准状态下), 比上年增长 2.8%。其中 SO₂ 排放量为 1495 万 t, 与上年基本持平。1995 年我国 SO₂ 排放量达到 2370 万 t, 超过欧洲和美国, 使我国成为世界 SO₂ 排放第一大国, 之后连续多年排放量超过 2000 万 t, 图 1-1 表明了我国历年 SO₂ 的排放情况, 由于采取了一系列有效的控制排放政策和措施, 目前已取得了一定的成效, 但 SO₂ 的排放量仍十分巨大, 污染严重。2000 年, 全国废气中 SO₂ 排放总量 1995 万 t, 其中工业来源的排放量 1612 万 t, 生活来源的排放量 383 万 t; 烟尘排放总量 1165 万 t, 其中工业烟尘排放量 953 万 t, 生活烟尘排放量 212 万 t; 工业粉尘排放量 1092 万 t。2001 年, 全国废气中 SO₂ 排放总量 1947.8 万 t, 其中工业来源的排放量 1566.6 万 t, 生活来源的排放量 381.2 万 t。

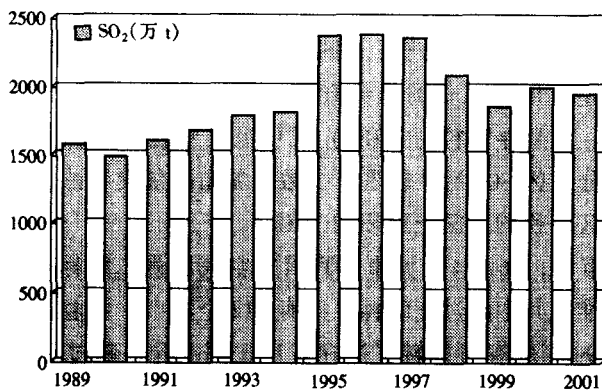
表 1-9

我国不同煤种的平均含硫量

煤 种	样 品 数	煤干燥基含硫量 (%)		
		平均值	最低值	最高值
褐 煤	91	1.11	0.15	5.20
长焰煤	44	0.74	0.13	2.33
不黏结煤	17	0.89	0.12	2.51
弱黏结煤	139	1.20	0.08	5.81

续表

煤种	样品数	煤干燥基含硫量 (%)		
		平均值	最低值	最高值
气煤	554	0.78	0.10	10.24
肥煤	249	2.33	0.11	8.56
焦煤	295	1.41	0.09	6.38
瘦煤	172	1.82	0.15	7.22
贫煤	120	1.94	0.12	9.58
无烟煤	412	1.58	0.04	8.54
样品总数	2093	1.21	0.04	10.24

图 1-1 我国历年 SO₂ 的排放情况

电力行业是用煤大户，以 2000 年为例，我国发电装机容量为 319321MW，发电量为 1368.5TW·h，均为世界第二位，其中火电装机容量为 237540MW，约占 74.4%，火电的发电量保持在 81% 左右。在火电机组的燃料中，煤炭占 95%，油气只占 5% 左右（主要用于少数特殊的电站、机组点火用油、联合循环机组及内燃机发电机组）。2000 年，我国发电总煤耗量约 6 亿 t，约占煤炭产量的 60%，排放 SO₂ 800 多万 t，占全国排放总量的 40% 以上，是 SO₂ 污染大户，因此削减火电厂的 SO₂ 排放是控制 SO₂ 排放总量的重点。

1.2.2 大气污染和酸雨污染现状

我国的大气污染属典型的煤烟型污染，以粉尘和酸雨危害最大，酸雨问题实质就是 SO₂ 污染问题。20 世纪 80 年代，全国的酸性降水主要分布在长江以南地区，北方除少数几个城市外，大部分地区降水为中性。

1990 年，城市总悬浮颗粒物年日均值的平均值为 387 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，北方城市为 475 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，南方城市为 268 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。总悬浮微粒污染严重的城市为石家庄、南充、吉林、乌鲁木齐、洛阳和唐山。城市大气 SO₂ 污染南方重于北方，污染严重的城市为重庆、贵阳、宜宾、南充、石家庄、青岛和乌鲁木齐。城市氮氧化物年日均值的平均值为 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，北方城市为 47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，南方城市为 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。我国酸雨仍限于局部地区，但有扩大的趋势，西南和华南地区较为严重。

《中国环境状况公报》表明，1995 年与上一年相比，以城市为中心的环境污染在发

展,并向农村蔓延,生态破坏的范围仍在扩大。我国的酸雨主要分布于长江以南、青藏高原以东地区及四川盆地。华中地区酸雨污染最重,其中心区域酸雨年均 pH 值低于 4.0,酸雨频率在 80% 以上。以南充、宜宾、重庆和遵义等城市为中心的西南酸雨区有所缓解,但仅次于华中地区,其中心地区年均 pH 值低于 5.0,酸雨频率高于 80%。华东沿海地区的酸雨主要分布在长江下游地区以南至厦门的沿海地区,该区域酸雨污染强度较华中、西南地区弱,但区域分布范围较广,覆盖苏南、皖南、浙江大部分地区及福建沿海地区。华南地区的酸雨主要分布在珠江三角洲及广西的东部地区,重污染城市降水年均 pH 值在 4.5~5.0 之间,中心区域酸雨频率为 60%~90%。广西地区的酸雨污染较普遍,除南部滨海地区,大部分地区酸雨频率在 30% 以上,酸雨区沿湘桂走廊向东扩展,与珠江三角洲相连。北方城市降水年均 pH 值低于 5.6 的有青岛、图们、太原和石家庄。

2000 年中国城市空气质量恶化的趋势有所减缓,部分城市空气质量有所改善,但整体污染水平仍较严重。总悬浮颗粒物(TSP)或可吸入颗粒物(PM₁₀)是影响城市空气质量的主要污染物,部分地区 SO₂ 污染较重,少数大城市氮氧化物浓度较高。酸雨区范围和频率保持稳定,酸雨区面积约占国土面积的 30%。

统计的 338 个城市中,36.5% 的城市达到国家空气质量二级标准,63.5% 的城市超过国家空气质量二级标准,其中超过三级标准的有 112 个城市,占监测城市的 33.1%。城市空气质量总体上比 1999 年度有所好转,达标城市比例上升,超过三级标准的城市比例下降。

总悬浮颗粒物(TSP)或可吸入颗粒物(PM₁₀)年均值超过国家二级标准限值的城市占统计城市的 61.6%。20.7% 的城市 SO₂ 浓度年均值超过国家二级标准限值,比上年度下降近 8 个百分点。人口集中、机动车较多的特大型城市氮氧化物污染相对较重。

47 个环境保护重点城市中,27 个城市空气质量达到国家二级标准,7 个城市空气质量为三级,13 个城市空气质量超过三级标准。

酸雨出现的区域与往年相比无明显变化,基本维持了近几年形成的格局。降水年均 pH 值小于 5.6 的城市主要分布在长江以南、青藏高原以东的广大地区及四川盆地。华中、华南、西南及华东地区仍是酸雨污染严重的区域;北方只有局部地区出现酸雨。

2000 年,监测的 254 个城市中,降水 pH 值范围在 4.10~7.70 之间,157 个城市出现过酸雨,占 61.8%,其中 92 个城市年均 pH 值小于 5.6,占 36.2%。“酸雨控制区”中 102 个城市和地区降水年均 pH 值范围在 4.10~6.90 之间,其中 95 个城市出现酸雨,占 93.1%,72 个城市年均降水 pH 值小于 5.6,占 70.6%。酸雨面积占国土面积的 30%,是世界三大酸雨区之一。

2001 年,全国城市空气质量基本稳定,城市空气质量满足国家二级标准、三级标准和劣于三级标准的城市比例各占 1/3;南方地区酸雨污染较重,酸雨控制区内 90% 以上的城市出现了酸雨。

进行城市空气监测的 341 个城市中,114 个城市达到或优于国家空气质量二级标准,占统计城市数的 33.4%。其中海口、三亚、肇庆等 10 个城市空气质量达到一级标准。114 个城市空气质量为三级,占统计城市数的 33.4%。113 个城市空气质量劣于三级,占统计