

# 工业脱硫技术

清华紫光同兴环保公司组织编写  
雷仲存 主编 王宇 主审



化学工业出版社  
环境科学与工程出版中心

# 工业脱硫技术

清华紫光同兴环保公司组织编写

雷仲存 主编

王 宇 主审

化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

工业脱硫技术/雷仲存主编. —北京:化学工业出版社,2001.4

ISBN 7-5025-3103-3

I. 工… II. 雷… III. 脱硫-技术 IV. X701.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 14597 号

---

工业脱硫技术

清华紫光同兴环保公司组织编写

雷仲存 主编

王 宇 主审

责任编辑: 管德存

责任校对: 凌亚男

封面设计: 郑小红

\*

化学工业出版社 出版发行  
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话:(010)64918013

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

北京市燕山印刷厂装订

开本 850 × 1168 毫米 1/32 印张 12 1/2 字数 342 千字

2001 年 5 月第 1 版 2001 年 5 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—4000

ISBN 7-5025-3103-3/X·64

定 价: 30.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

## 内 容 提 要

本书系统介绍了工业脱硫的各种工艺、设备及运行参数。全书共分五章,第一章介绍了国内外脱硫技术的发展概况与趋势;第二章介绍了燃烧前脱硫的几种方法;第三章为燃烧中脱硫;第四章为燃烧后脱硫,包括干法、半干法及湿法脱硫技术;第五章给出了国内常用的脱硫设备及应用实例。

本书可供工业废气治理工程技术人员及大专院校环境工程专业师生参阅。

## 前 言

我国政府历来对环保工作比较重视，在可持续发展战略中，把环境保护工作摆在十分显要的位置上。在《中华人民共和国国民经济和社会发展“九五”计划和2010年远景目标纲要》中，提出到2000年力争使环境污染的趋势得到基本控制。但是，随着经济的发展，我国的环境污染仍然十分严重，特别是大气中SO<sub>2</sub>的污染，国务院对此也非常重视，在1998年批准了国家环保局制定的“两控区”SO<sub>2</sub>和酸雨的控制方案。

1989年接触国外脱硫技术，感到国外脱硫技术发展较快，我国发展较慢，而且这方面资料书籍缺乏，1994年就想编写一本介绍各种脱硫方法的书，从那时就开始收集资料，直到今年，在清华紫光同兴环保公司的组织与支持下，才将此书完成。

王文杰同志参与了本书第一、二章的编写工作，雷仲存同志参与了第一、二、三、四章编写工作。张莉、陈亚丽小姐做了部分文字工作，刘念华做了部分文字和校对工作。

这本书主要是在国内外许多研究脱硫的专家、学者的研究成果的基础上编写而成的，其中引用了许多专家、学者的研究成果、数据、图表等。在编写过程中，考虑到行业习惯，部分单位使用了非法定计量单位。其换算关系如下： $1\text{atm} = 1.013 \times 10^5\text{Pa}$ ； $1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 0.98 \times 10^3\text{Pa}$ ； $1\text{mmH}_2\text{O} = 9.8\text{Pa}$ ； $1\text{mmHg} = 133.32\text{Pa}$ ； $1\text{ft} = 0.3048\text{m}$ ； $1\text{cal} = 4.184\text{J}$ ； $1\text{Gs} = 10^{-4}\text{T}$ ；书中Nm<sup>3</sup>指标准状态下立方米体积。

由于我们水平有限，时间仓促，难免有错误，望专家、同行、朋友批评指正。

编 者

2000. 8

# 目 录

第一章 国内外脱硫技术发展概况 .....	1
第一节 日本脱硫技术发展概况 .....	1
一、日本酸性气体污染状况 .....	1
二、大气污染防治技术研究进展 .....	2
第二节 美国脱硫技术发展概况 .....	5
一、美国 1990 年洁净空气法修正案 .....	5
二、煤燃烧前的控制技术 .....	7
三、美国 SO <sub>2</sub> 控制技术发展趋势 .....	12
四、美国电力工业状况 .....	16
第三节 中国脱硫技术发展概况 .....	21
一、湿式除尘兼脱硫装置 .....	22
二、干湿法组合式小型除尘脱硫装置 .....	27
第二章 燃烧前脱硫（煤脱硫） .....	31
第一节 机械分选法 .....	31
一、浮选的基本原理 .....	31
二、浮选流程 .....	34
三、影响浮选过程的因素 .....	40
四、浮选效果的评定 .....	44
第二节 高梯度强磁分离煤脱硫技术 .....	46
第三节 微波辐射法 .....	49
一、微波辐射法脱硫的原理 .....	49
二、微波辐射法脱硫的应用前景 .....	54
第四节 微生物降解法 .....	55
一、微生物脱硫的原理 .....	55
二、微生物脱硫技术开发现状 .....	57
三、微生物脱硫技术的前景 .....	59
四、存在的问题和改进措施 .....	60

<b>第三章 燃烧中脱硫 (炉内脱硫)</b>	66
<b>第一节 石灰/石灰石直接喷射法原理</b>	66
<b>第二节 石灰石注入炉内分段燃烧法</b>	77
一、二次燃烧技术	78
二、吸收剂喷射	79
三、气体二次燃烧-吸收剂喷射 (GR-SI) 联合系统	80
四、GR-SI 系统的成本效益	82
<b>第三节 炉内注入石灰并活化氧化钙法</b>	83
一、原理	84
二、CaO 水合过程	85
<b>第四节 循环流化床燃烧法</b>	93
一、原理	93
二、特点	95
三、应用实例	95
<b>第五节 增压流化床燃烧燃气/蒸汽联合循环法 (PFBC-CC)</b>	100
<b>第六节 煤气/蒸汽联合循环 (IGCC)</b>	102
<b>第七节 型煤固硫法</b>	104
一、工业固硫型煤	104
二、自成型型煤	108
<b>第八节 炉内喷钙和氧化钙活化法 (LIFAC)</b>	116
一、LIFAC 脱硫工艺原理	116
二、LIFAC 分步实施	117
三、LIFAC 在中国	119
四、运行实例	120
<b>第四章 燃烧后脱硫 (FGD)</b>	124
<b>第一节 干法脱硫</b>	124
一、氧化铜法	124
二、电子束照射法 (EX)	130
三、脉冲电晕放电法	135
四、活性炭吸附法	144
五、催化氧化和还原法	162
<b>第二节 半干法脱硫技术</b>	167
一、循环流化床烟气脱硫技术	167

二、转炉钢渣作脱硫剂 .....	173
三、NID 法 .....	176
四、喷雾干燥法 .....	189
第三节 湿法脱硫 .....	216
一、氨法 .....	222
二、双碱法 .....	260
三、石灰/石灰石湿式洗涤法 .....	280
四、钠碱法 .....	340
五、氧化镁法 .....	362
六、海水脱硫 .....	371
第五章 国内中小锅炉常用脱硫设备及应用实例 .....	378
实例 1 网膜塔除尘脱硫系统 .....	378
实例 2 双击式除尘脱硫装置 .....	379
实例 3 多管除尘、湿法脱硫烟气净化装置 .....	380
实例 4 旋流塔板湿法烟气脱硫除尘设备 .....	384
实例 5 THUS 脱硫除尘一体化设备 .....	386
参考文献 .....	391



# 第一章 国内外脱硫技术发展概况

## 第一节 日本脱硫技术发展概况

### 一、日本酸性气体污染状况

#### 1. 二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )

从 1965 年开始, 日本有 15 个监测站对  $\text{SO}_2$  进行连续性监测。这些监测站设置在当年日本具有代表性的二氧化硫污染地区, 基本分布在 (东) 京 (横) 滨地区、四日市、界市。二氧化硫污染浓度在 1967 年达到最高值  $0.059 \times 10^{-6}$ , 以后逐年下降, 近年来保持稳定。降低二氧化硫浓度, 主要以重油脱硫和普及排烟脱硫装置为主。近 20 年来, 日本努力落实这些对策, 使重油平均含硫量减少了一半, 排烟脱硫装置的总处理能力上升了 30 倍。由于对策奏效, 使二氧化硫引起的大气污染得到明显改善。因此, 达到环境标准的监测站比率逐年增加, 1989 年为 99.5%, 目前继续保持理想的水平。据估计, 仍未达到环境标准的大多数监测站可能受到了樱岛等火山活动的影响。

#### 2. 二氧化氮 ( $\text{NO}_2$ )

从 1970 年开始, 有 15 个监测站对二氧化氮进行连续监测。监测结果表明, 从表面上看 1979 年开始, 污染浓度稍有下降, 1985 年开始上升, 到 1987 年开始保持稳定。在 1981 年开始实施氮氧化物总量控制的地区 (东京地区, 横滨, 大坂), 1978 年以来的连续监测结果表明, 污染状况一直不见改善。

氮氧化物污染源分为固定污染源和移动污染源两大类。日本实施的固定污染源对策在技术方面包括低  $\text{NO}_x$  燃烧技术和采用优质燃料以及排烟脱硝等。例如, 1989 年排烟脱硝装置设置数目为 434 个, 处理能力为  $158665 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$  (标准状态), 目前数目还在继续

增加。其他对策包括，从 1973 年开始对企业实施排放规制，此后又四次强化排放标准。规制对象也不断增加：从 1981 年开始，在东京都等 3 个地区实施总量控制。最近，又把燃气轮机、燃气发动机、汽油发动机等排烟污染源列为规制对象，依次强化规制。可以认为，这些固定污染源对策取得了很大成绩。移动污染源对策主要是从 1973 年以来，逐渐强化汽车排气浓度的允许限度。以汽车来说，与未进行规制时相比，排放量已降至原来的 1/10 以下；对卡车和公共汽车也加强了规制。尽管实施了上述严格规制，但是包括总量控制地区在内，仍未达到环境标准。原因可能是近年来经济形势较好，燃料用量增加，物资流通活跃又使汽车交通量增加，这一系列因素抵消了实施规制和对策的效果。

## 二、大气污染防治技术研究进展

从 19 世纪 60 年代开始，日本经济迅速发展。与此同时，也出现了以大气污染为主的公害问题。从而使大气污染治理技术迅速发展。目前，人们认为日本在大气污染防治技术水平和装置普及程度方面，在世界上处于最先进的行列。

### 1. 控制氮氧化物排放

(1) 改善燃烧 锅炉大多以含大量可燃烧的煤炭或重质油为燃料。因此，可以在燃烧过程中控制  $\text{NO}_x$  氮氧化物的排放。具体方法包括：低氧燃烧、排气循环燃烧、喷水、二级燃烧、浓差燃烧及其各种方法的组合。效果最好的是二级燃烧、浓差燃烧。

现在，人们又开发出更好的技术。把二级燃烧法又做了改进，即扩大还原燃烧法和采用碳氢化合物在炉内进行脱硝反应的燃料再注入法。有些人也把它称为三级燃烧法或再燃烧法。具体方法是在一次燃烧后的气体中加入燃料，制造一个缺乏空气的还原领域，把一次燃烧时生成的  $\text{NO}_x$  还原，最后加入空气进行完全燃烧。为减轻炉内脱硝的负担，在一次燃烧时也采用低  $\text{NO}$  喷嘴或浓差燃烧法，这对于控制  $\text{NO}$  的生成有效。

二级燃烧时  $\text{NO}$  的生成模式，基本近似于燃料中的氮经过氰化或胺类的中间体变成  $\text{NO}$ ，或中间体的一部分使  $\text{NO}$  还原后，变为

$\text{N}_2$ 。炉内脱硝法在此基础上，根据碳氢化合物原子团的还原作用，把在一次燃烧时生成的  $\text{NO}$  还原。由于不控制追加燃料后生成的  $\text{NO}$ ，因此有排放，但量较少。

三级燃烧法用于锅炉的实验数据表明，煤炭单级燃烧时产生  $800 \times 10^{-6}$  的  $\text{NO}_x$ ；三级燃烧时， $\text{NO}_x$  为  $100 \times 10^{-6}$ 。

由于炉内脱硝法设计上的参数较多，难以制定最佳条件。因此，炉内脱硝机理的模拟是非常重要的。在碳氢化合物燃料复杂的燃烧环境中，计算出氮氧化物进行反应时的主要反应线路，作为设计依据。与此有关的研究还有：无触媒脱硝反应，即在燃烧排气中加入碳氢化合物，使  $\text{NO}_x$  还原。对此进行了实验室和理论研究并提出了模拟方法。

(2) 电子束法 为净化排气，排烟脱硝采用氨选择接触还原法 (SCR 法)，排烟脱硫则普及了湿式石灰石-石膏法。而电子束法显示可以采用一种工艺来实现反应。

电子束法是在排气中加入水蒸气、氨，在大约  $70^\circ\text{C}$  的条件下，照射电子束。使  $\text{SO}_x$  变为硫酸， $\text{NO}_x$  变为硝酸。然后，它们与事先加入的氨发生反应，分别变为硫铵和硝铵。

分析结果表明，生成物的 80% 是硫铵，5% ~ 9% 是硝铵。由于它不含有害杂质，因此可作为肥料使用。电子束法耗电较少。虽然电子束能产生 X 射线，但可以用隔墙挡住。这种方式独特的魅力是能生产化肥。技术方面也无太大的困难之处，特别适用于既有大气污染问题又缺乏肥料的发展中国家。

## 2. 控制硫氧化物排放

(1) 活性炭法干式脱硫 日本在排烟脱硫技术方面是世界领先的。主要有石灰法、苛性钠法等湿式方法。这些方法用水量大，而且需高级处理，副产物 (石膏) 也需处理。日本工业技术院从 1966 年开始将活性炭法干式脱硫列入科研计划，然而，由于活性炭成本高，没有实际应用。后来，为实施  $\text{NO}_x$  对策，研究了  $\text{NH}_3$  注入式接触还原法。同时，由于活性炭制造技术的进步，此方法实际应用的可能性增加。

同时脱硫、脱硝的试验性装置也在研制中，两项操作分别在一级脱硫塔和二级脱硝塔进行。在二级脱硝塔用过的活性炭重新在脱硫塔中使用后，送到脱离塔再生。脱硫和脱硝不能同时在一级塔进行是因为脱硝率会被入口的高浓度  $\text{SO}_2$  大大降低。

在脱硫塔被脱离出的约 15% 的高浓度  $\text{SO}_2$  气体，能使还原炭进行部分燃烧，然后在还原塔作为单质硫黄被回收。此方法的试验性工作已经结束，从 1990 年开始正式进行积累材料数据的实验。

(2) 利用煤炭的干式脱硫 随着煤炭用量的增加，如何有效利用大量的煤炭成为一大课题。煤灰-石灰-石膏系列硬化物具有优良的脱硫效果。脱硫剂是把上述三种物质各 1/3 混合并加水搅拌后，用挤压机做成颗粒状（直径 6mm，长 3~10mm）。 $\text{SO}_2$  与消石灰发生吸收反应，它以相当高的反应率固定为石膏。本方法由脱硫剂制造系统和  $\text{SO}_2$  吸收系统组成。吸收后的石膏硬化物可再用。

(3) 半干式简易脱硫 干式洗涤器可同时处理燃煤气体中的粉尘和硫氧化物。这时，可用碳酸钙代替碱液-消石灰作为脱硫剂，在燃烧室内进行炉内脱硫，即一次脱硫。同时，喷水进行二次脱硫，这是一种简易脱硫方法。

目前，流动床燃烧引人注目。此方法采用石灰石作为流动媒体，在炉内脱硫。日本工业技术院资源环境技术综合研究所以前也进行过吹入石灰石，炉内脱硫的研究，其中有一种方法是向气体空气预热器排放的排气喷水，利用未发生反应的飞散生石灰进行二次脱硫。此方法的特点是用二次脱硫提高干式吹入法的低脱硫率。优点是无排水、运转简便、成本低。

(4) 静电的应用 如果用高能电子束照射排气，会使气体分子被电离或被激活，生成化学活性原子团，它与  $\text{NO}_x$  或  $\text{SO}_x$  发生反应，能达到同时脱硫脱氮的效果。

另一方面，以往的电除尘装置依靠电晕放电，生成大量臭氧，可以氧化  $\text{NO}$  或  $\text{SO}_2$ 。为提高原子团的能量效率，可以利用脉冲电子流电晕放电。把脉冲电子流放电氧化  $\text{SO}_2$  的能量效率与电子束照射法进行比较实验，结果用脉冲电子流放电要比电子束法效率高。

(5) 微生物的应用 微生物的应用可以在常温常压条件下制造清洁能源。如依靠微生物去除液化油中的含硫成分。

## 第二节 美国脱硫技术发展概况

### 一、美国 1990 年洁净空气法修正案

1971 年美国实施洁净空气法（以下简称 CAAA），规定 73MW 以上的新建电厂锅炉  $\text{SO}_2$  排放不得超过  $1238\text{mg}/\text{m}^3$ （标准状态）。1971 年第一次修改法规，规定了  $\text{SO}_2$  排放浓度和脱硫率（见表 1-1）。

表 1-1 1971 年修正案的  $\text{SO}_2$  排放浓度和脱硫率

适用锅炉	煤种	排放极限（标准状态）/ ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	脱硫率/%
73MW 以上新建锅炉	低硫煤	619	70
	中硫煤	619	70 ~ 90
	高硫煤	1238	> 90

自 1971 年至 1991 年，美国的环境质量得到了改善，其中粉尘排放量降低 61%，CO 降低 5%， $\text{SO}_2$  降低 27%， $\text{NO}_x$  降低 1%，但是严重的污染问题依然存在，酸雨仍然没有得到控制。

1990 年 11 月 15 日颁布了洁净空气法修正案（CAAA1990）。新修正案的主要指标是：①大气有害污染物至少降低 75%；②每年削减  $\text{SO}_2$  排放量至少 1000 万吨，以减轻酸雨的主要成因；③逐步减少氟、氯碳化物及其他化合物对臭氧层的破坏；④净化汽车、燃料等的排气。

#### 1. 酸雨控制法

CAAA1990 的第 IV 项为酸雨控制法，规定每年  $\text{SO}_2$  排放量削减 1000 万吨，化石燃料电厂在 1980 年水平上每年削减 50%。从 1990 年至 2005 年全面执行控制酸雨计划期间，企业投资估计每年为 30 ~ 39 亿美元。降低  $\text{SO}_2$  排放的投资将转给消费者，至 2000 年，全国平均电价提高 0.5% ~ 1.2%， $\text{NO}_x$  控制法规执行后，将使全国平均电价再提高 0.1%。

该法规还包括：排放量许可制度、许可权交易制度、超标排放惩罚制度和连续排放监测的要求等。

## 2. 削减 SO<sub>2</sub> 排放量计划

削减 SO<sub>2</sub> 排放计划分两个阶段：第一阶段自法规颁布之日起到 1995 年 1 月 1 日。要求污染严重的 110 个火电厂（总容量为 89545MW，大多数是燃煤电厂）将 SO<sub>2</sub> 平均排放量降至  $1081 \times 10^{-6}$  g/J 以下，第二阶段自 1995 年至 2000 年 1 月 1 日，上述污染严重的 110 个火电厂必须进一步削减 SO<sub>2</sub> 排放量至  $522 \times 10^{-6}$  g/J 以下。第一、第二阶段必须削减 SO<sub>2</sub> 的电厂及机组统计数见表 1-2：

表 1-2 第一、第二阶段受影响的电厂及机组

项 目	州 数	工厂数	机 组 数
第一阶段	21	110	263
第二阶段	27	785	> 2100
合 计	48	895	> 2300

对所有电厂每年预留 900 万吨 SO<sub>2</sub> 排放量许可权，以备电厂生产增长使用。

## 3. 削减 SO<sub>2</sub> 排放量的途径

可选择的途径包括：①改变燃料，即改用含硫低的煤种或天然气；②安装烟气脱硫装置或其他技术（如高效发电工艺节煤，洗煤等）；③把电力生产从污染严重的电厂转移到比较洁净的电厂；④SO<sub>2</sub> 排放许可权交易。

## 4. 优惠政策

CAAA1990 中制定了一些优惠政策，在削减 SO<sub>2</sub> 排放的第二阶段，为鼓励电厂安装高效洗涤装置，可放宽期限 2 年或发给额外的排放权。在第二阶段对采用洁净煤技术的电厂可放宽期限 4 年。

## 5. 建立许可权制度

单位排放许可权定义为特有者可排放 1 吨 SO<sub>2</sub>。EPA 根据 1980 年 SO<sub>2</sub> 排放情况，授予每一发电机组一定数量的 SO<sub>2</sub> 排放许可权。大型的燃煤电厂通常可以削减比要求更多的 SO<sub>2</sub> 排放量，而将其剩

余的许可权在市场出售。须削减  $\text{SO}_2$  排放量的企业，可以不采取代价昂贵的削减措施而购买其他企业的许可权，以达到全部或部分控制的目的。这种方法企业可最经济地满足  $\text{SO}_2$  排放量的要求。

新修正法执行两年来，许可权交易市场在逐渐发展。芝加哥交易所已经开展许可权交易业务。第一笔许可权交易于 1992 年 5 月在 Wisconsin 电厂和 Light 公司之间成交。EPA 为了刺激许可权交易市场的发展，设置少量的许可权，在交易市场拍卖和出售，任何人都可以购买，升值时可从中获利。

#### 6. $\text{SO}_2$ 排放量监测

执行酸雨控制计划的关键是必须具备准确监测排放量的能力。根据 CAAA1990 年规定，EPA 要求企业使用高准确度的系统来连续监测  $\text{SO}_2$  的排放量，亦包括  $\text{NO}_x$  等的监测，企业每三个月需报出监测结果。当  $\text{SO}_2$  排放量超过允许值时，企业将受到严厉的经济惩罚；即每超标排 1 吨  $\text{SO}_2$ ，罚款 2000 美元。

#### 7. $\text{NO}_x$ 的控制计划

过去的空气洁净法只对汽车和新建工厂排放的  $\text{NO}_x$  加以限制，新的修正案则对现有电厂排放  $\text{NO}_x$  进行限制。据 EPA 估计，按新的修正案规定，到 2000 年每年多削减  $\text{NO}_x$  排放量约 150 ~ 200 万吨，控制  $\text{NO}_x$  计划涉及大约 800 台燃煤电厂锅炉。

### 二、煤燃烧前的控制技术

从公用事业发电厂减少二氧化硫排放量的一种具有吸引力的方法是在燃烧矿物燃料之前设法减少燃料内的硫含量。这可以采用两种方法：既可以将燃料配置成低硫燃料，也可以用洗煤的方法除硫或燃油除硫。

煤的配置及煤的净化是保证减少排放量的技术，它们曾被许多地方采用过，以保证通过 1970 年颁布的空气净化条例。美国公用事业发电厂燃煤的平均含硫量从 1975 年的 2.2% 降低到 1985 年 1.4%。美国能源部估计如果燃煤的含硫量保持在 2.2%，那么 1985 年二氧化硫的排放量将会高于每年 8100 万吨（美国能源部，1987 报告）。含硫量平均值向较低值移动，反映了煤的配置、煤的

净化及在西部建造相对较多的燃烧低硫煤发电厂的综合效果。

### 1. 煤的配置

对于需要减少二氧化硫排放量的公用事业发电厂，最价廉可取的选择之一是将煤配置成含硫较低的煤。当 1971 年公布新场所性能标准 (NSPS) 时，强制新的燃煤发电厂排放率为  $1.2 \text{ lb}/10^6 \text{ Btu}$ ，采用称作“混合煤”，不要控制，其排放率低于  $1.2 \text{ lb}/10^6 \text{ Btu}$ ，这样电厂明显的增加。不过 1979 年出于立法的需要，导致 NSPS 的修改，取消了新的燃煤电厂的战略，对其加上了新的要求，要将二氧化硫脱除量提高 70% ~ 90%，在那时要做到这点，就需要采用烟气脱硫。

据调查，美国东部及中西部公用事业发电厂使用的是大量低硫煤 (<1%)，另外根据所使用的含硫煤范围，对使用低硫煤给以“奖金”。不过，电力研究 (1986) 指出，1985 年奖金在全国范围内是变化的，从北卡罗利亚小于零到西弗尼亚及伊利诺斯州的 40 ~ 50 美分/ $10^6 \text{ Btu}$ ，及印第安那州的高达 1.5 美元/ $10^6 \text{ Btu}$ 。

宾夕法尼亚州 H 城的煤加工厂是一座国家工艺煤净化设备厂，向 H 城发电厂提供所需发电 1800 兆瓦煤量的大约 50%。自从 1978 年运行以来，每月约加工含硫 2% 的宾州煤 350000 吨。该工厂生产两种产品：一种混合煤能获得  $1.2 \text{ lb}/10^6 \text{ Btu}$  (占加工煤的 26%) 及第二种能获得  $3.2 \text{ lb}/10^6 \text{ Btu}$  (占加工煤的 74%) (Greco, 1987)。制造混合煤部分的除污效率要求超过 50%。

### 2. 煤的脱硫

现在有一些更新的物理煤净化方法，例如多级漂洗、静电分离以及油烧结，能去除 90% 矿石中硫，或约 65% 的总含硫 (美国环保中心，1986 年报告)。

要想得到比物理分离方法更进一步的效果，就需要从煤中分离出混合着的有机硫。煤净化方面的研究与发展在以下两个领域进行：化学及生物的净化，但在 1995 ~ 2000 年间还不可能商品化，化学净化尚处在论证阶段，而微生物净化还处在实验室规模 (美国环保中心 1986 报告)。

化学净化具有除去总硫量 90% ~ 95% 的能力 (同时除去 95% ~



98%的灰尘),包括在高温及高压下用化学物品或溶剂精制煤。尽管在这些工序中,大多数硫已被清除,化学净化的费用无论是比传统的,还是更新的物理净化煤方法都要昂贵得多,但是在比较脱除效率的技术时,化学净化具有竞争力。

微生物净化煤是一种实验技术,它基于某种类型的真菌及细菌能吸收硫,所以能溶解煤。这种方法要作为商业用,尚需通过基础研究的努力。

### 3. 对新电厂的控制技术

新电厂采用的技术至少能取得符合1979年颁布的修改过的NSPS性能水平要求。这些规定要求在排放出 $0.6 \text{ lb}/10^6 \text{ Btu}$ 时,最少要有减少二氧化硫排放量70%的能力,而在排放出 $1.2 \text{ lb}/10^6 \text{ Btu}$ 时就要求具有减少大于90%的能力。

### 4. 对现有电厂的更新技术

更新技术一般设计成能得到清除效率符合1971年NSPS及地方SIP规定要求的技术。尤其是控制技术清除效率能满足或超过1979年NSPS的要求,使这些技术也可用于新电厂。有时把许多技术组合在一起,也可以提高脱硫效率。

(1) 控制二氧化硫排放量 过去,控制二氧化硫的主要方法是通过二次燃烧加工,烟气除硫。尽管烟气脱硫技术有进步,但许多发展起来的技术取代了烟气除硫。这些新技术设计成进入燃烧室之前就除掉二氧化硫,或在燃烧区的除灰下游除掉二氧化硫。

(2) 先进的烟气除硫 自从新场所性能标准(NSPS)1979颁布以来,新电厂需要选用一般现代粉煤发电厂采用净化排气的湿式及干式清洗器;早期的形式存在着操作及机械方面的许多问题,这些问题目前已作很大的修改。现代的FGD设计能满足1979年NSPS日常的要求(清除90%高硫煤,70%低硫煤排放量,以及对氧化氮 $< 0.6 \text{ lb}/10^6 \text{ Btu}$ )。目前正在继续研究与发展FGD系统。先进的FGD的优点是:在商业运行中,公用事业已有超过100个装置的经验。FGD技术的缺点包括有大量固体废弃物而很少能再利用,以及当场地有限时,其费用相对较高。