

# 烟气脱硫脱硝 工艺手册

周晓猛 主编 徐宝东 主审



化学工业出版社

# 烟气脱硫脱硝 工艺手册

周晓猛 主编 徐宝东 主审



化学工业出版社

·北京·

本书汇总了有关锅炉烟气脱硫脱硝方面的标准规范、工艺流程、设计计算及设备选型等资料。内容包括烟气脱硫技术,湿法脱硫工艺,脱硫工艺设计,脱硫工艺计算,脱硫仪表及设备,烟气脱硝技术,管路材料与器材,设备管道布置等。

本书可供电力、化工、石化、冶金、轻工等行业从事脱硫脱硝设计的工程技术人员使用,也可供相关院校师生参考。

# 烟气脱硫脱硝工艺手册

## 图书在版编目(CIP)数据

烟气脱硫脱硝工艺手册/周晓猛主编. —北京:化学工业出版社, 2016.3

ISBN 978-7-122-26171-7

I. ①烟… II. ①周… III. ①烟气脱硫-技术手册②烟气-脱硝-技术手册 IV. ①X701-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 018172 号

责任编辑:左晨燕

装帧设计:韩飞

责任校对:宋夏

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市胜利装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张36 字数920千字 2016年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:198.00元

版权所有 违者必究

## 编 委 会

主 任：徐宝东

副主任：周晓猛 袁峥嵘

委 员：徐宝东 袁峥嵘 周晓猛 程治方 张 谦

王亚慧 孙佳利 陈登云 杨卫东 李仁贵

白新生 杨会娥 张 慧 项裕桥

## 目 前 言

《烟气脱硫脱硝工艺手册》是脱硫脱硝设计人员的实用工具书。本书体现脱硫脱硝行业的技术发展，包括设计规范和标准的更新，具有实用性强的特点，着重考虑使用者的方便，以及按化工的习惯对设备选型进行计算。广大编写人员本着科学严谨、不断进步的精神，完成了相关的编写任务，希望对广大设计人员能有所帮助。

《烟气脱硫脱硝工艺手册》由周晓猛主编，徐宝东主审，脱硫部分主要由张谦编写，脱硝部分由孙佳利编写，附录由李仁贵编写。参与本书编写和给予支持的还有李淑华、程治方、李思凡、张志超、杨晓燕、邹鸿岷、窦一文、杨会娥、毕永军、伍明、杜涵雯、赵燕、王亚慧、孙佳利、孟连江、刘荣甫、尹晔东、李发军、李薇、刘旭辉、林永利、印文雅、关宇、杨成宇、吕文昱、徐振海、张德生、吕凤翔、闫振利、刘明、刘新、宋向东、蔺向阳、刘训稳、张效峰、宋炯亮、韩亚军、朱硕、张莘利、卢大勇、谭茜、熊列、薛瑞、白新生、袁峥嵘、陈登云、杨卫东、张慧、项裕桥等，在此表示感谢！

编者于 2015 年 10 月 16 日

# 目 录

<b>1 烟气脱硫技术</b> .....	<b>1</b>
1.1 污染与控制 .....	1
1.1.1 燃料的污染 .....	1
1.1.2 污染的排放 .....	1
1.1.3 控制的策略 .....	3
1.2 洁净煤化工技术 .....	3
1.2.1 煤化工原理 .....	3
1.2.2 煤气化技术 .....	3
1.2.3 煤液化技术 .....	4
1.2.4 水煤浆技术 .....	4
1.3 燃煤的脱硫技术 .....	5
1.3.1 燃烧前脱硫技术 .....	5
1.3.2 燃烧中脱硫技术 .....	7
1.4 烟气的脱硫技术 .....	10
1.4.1 烟气脱硫方法 .....	10
1.4.2 湿法烟气脱硫 .....	10
1.4.3 半干法烟气脱硫 .....	13
1.4.4 干法烟气脱硫 .....	15
1.4.5 烟气脱硫选择 .....	17
<b>2 湿法脱硫工艺</b> .....	<b>19</b>
2.1 湿法脱硫技术 .....	19
2.1.1 脱硫剂的选择 .....	19
2.1.2 湿法种类划分 .....	20
2.2 石灰石/石灰-石膏脱硫法 .....	21
2.2.1 技术方法 .....	21
2.2.2 反应原理 .....	21
2.2.3 系统描述 .....	24
2.2.4 技术进展 .....	30
2.3 海水脱硫法 .....	32
2.3.1 技术方法 .....	32

2.3.2	反应原理	33
2.3.3	系统描述	35
2.3.4	技术进展	41
2.4	氨水脱硫法	43
2.4.1	技术方法	43
2.4.2	反应原理	43
2.4.3	系统描述	45
2.4.4	技术评价	52
2.5	双碱法脱硫	55
2.5.1	技术方法	55
2.5.2	反应原理	56
2.5.3	系统描述	59
2.5.4	技术评价	62
2.6	氧化镁脱硫	63
2.6.1	技术方法	63
2.6.2	反应原理	65
2.6.3	系统描述	69
2.6.4	氢氧化镁脱硫	72
2.7	钠碱法脱硫	73
2.7.1	技术方法	73
2.7.2	反应原理	73
2.7.3	系统描述	75
2.7.4	W-L 工艺介绍	78
2.8	其他脱硫法	79
2.8.1	柠檬酸钠法	79
2.8.2	碱性硫酸铝法	79
2.8.3	氧化锌法	81
2.8.4	氧化锰法	81
2.8.5	硫化碱法	83
2.8.6	可溶性钙盐脱硫技术	84

### **3 脱硫工艺设计** ..... 90

3.1	脱硫工艺	90
3.1.1	工艺流程	90
3.1.2	系统描述 (氨法)	91
3.2	设计条件	94
3.2.1	煤质分析	94
3.2.2	设备参数	95
3.2.3	氨吸收剂 (示例)	96
3.2.4	副产硫铵 (示例)	96

3.2.5	基础数据	96
3.3	工艺计算	99
3.3.1	烟气数据	99
3.3.2	吸收计算	100
3.3.3	塔径计算	103
3.3.4	塔高计算	104
3.3.5	烟气计算	105
3.3.6	计算结果	107
3.4	设备选型	108
3.4.1	氨水系统	108
3.4.2	烟气系统	109
3.4.3	吸收系统	109
3.4.4	氧化系统	112
3.4.5	硫铵系统	114
3.4.6	相关系统	120
3.5	钙法设计	122
3.5.1	基础数据	122
3.5.2	平衡计算	125
3.6	钠法设计	126
3.6.1	基础数据	126
3.6.2	吸收计算	127
3.6.3	设备计算	127

## **4 脱硫工艺计算** ..... **131**

4.1	锅炉形式	131
4.1.1	锅炉的工作原理	131
4.1.2	锅炉的发展分类	133
4.1.3	自然循环锅炉	136
4.1.4	直流锅炉	141
4.1.5	强制循环锅炉	143
4.2	燃料组成	145
4.2.1	燃料成分	145
4.2.2	燃料分析	145
4.2.3	固体燃料	146
4.2.4	液体燃料	147
4.2.5	气体燃料	149
4.3	烟气计算	150
4.3.1	燃烧计算	150
4.3.2	计算方法	151
4.3.3	燃油计算	153



4.3.4	燃煤计算	155
4.4	管道阻力计算	158
4.4.1	设计管径	158
4.4.2	管道流体阻力	161
4.4.3	直管阻力计算	161
4.4.4	局部阻力计算	164
4.4.5	不可压缩单相流体阻力	167
4.4.6	可压缩型单相流体阻力	170
4.5	浆液管路设计 (HG/T 20570.7)	174
4.5.1	浆液的流型及管径	174
4.5.2	计算的依据及方法	174
4.5.3	计算的步骤及示例	177
4.6	烟气阻力设计	182
4.6.1	阻力计算公式	182
4.6.2	阻力计算过程	183
4.6.3	系统总阻力	185

## **5 脱硫仪表及设备** **186**

5.1	仪表控制系统 (DL/T 5196—2004)	186
5.1.1	热工自动化水平	186
5.1.2	控制方式及控制室	186
5.1.3	热工检测	186
5.1.4	热工保护	187
5.1.5	热工顺序控制及连锁	187
5.1.6	热工模拟量控制	187
5.1.7	热工报警	187
5.1.8	脱硫装置分散控制系统	188
5.1.9	热工电源	188
5.1.10	厂级监控和管理信息系统	188
5.1.11	实验室设备	188
5.2	控制系统设计	189
5.2.1	系统设计要求	189
5.2.2	系统的可靠性	190
5.2.3	控制参数和回路	191
5.2.4	系统连锁与停运	197
5.2.5	控制规律和界面	198
5.3	常见设备选型	202
5.3.1	挡板门	202
5.3.2	增压风机	205
5.3.3	氧化风机	209

5.3.4	烟气除雾器	212
5.3.5	电除雾器	215
5.3.6	浆液脱水设备	217
5.3.7	循环浆液喷嘴	223
5.3.8	循环浆液泵	225

## 6 烟气脱硝技术 ..... 228

6.1	脱硝工艺方法	228
6.1.1	低 $\text{NO}_x$ 燃烧技术	228
6.1.2	选择性非催化还原	231
6.1.3	选择性催化还原	233
6.1.4	其他脱硝方法	238
6.2	工艺设计	239
6.2.1	还原剂的选择	239
6.2.2	还原剂储存及制备系统	239
6.2.3	SNCR 工艺流程反应系统	247
6.2.4	SCR 脱硝工艺系统构成	250
6.3	工艺参数计算	251
6.3.1	计算原则	251
6.3.2	计算过程	251
6.3.3	催化剂活性	253
6.3.4	$\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 转化率	253
6.4	脱硝设备选型	254
6.4.1	烟气反应系统	254
6.4.2	催化剂	254
6.4.3	辅助系统	255

## 7 管路材料与器材 ..... 258

7.1	管道材料选用 (HG/T 20646—1999)	258
7.1.1	材料选用基本原则	258
7.1.2	金属材料选用原则	258
7.1.3	非金属材料选用原则	260
7.1.4	金属管子选用	261
7.1.5	金属阀门选用	262
7.1.6	法兰选用	262
7.1.7	金属管件选用	263
7.1.8	垫片和紧固件	263
7.1.9	焊接材料的选用	264
7.2	无缝钢管	266
7.2.1	无缝钢管尺寸重量 (GB/T 17395—2008)	266

7.2.2	流体输送用无缝钢管 (GB/T 8163—2008)	267
7.2.3	中低压锅炉用无缝钢管 (GB 3087—2008)	269
7.2.4	不锈钢无缝钢管 (GB/T 14976—2012)	269
7.3	焊接钢管	273
7.3.1	低压流体输送用焊接钢管 (GB/T 3091—2008)	273
7.3.2	奥氏体不锈钢焊接钢管 (HG 20537—92)	275
7.4	复合管	278
7.4.1	衬胶钢管和管件 (HG 21501—93)	278
7.4.2	钢衬塑料复合管 (HG/T 2437—2006)	283
7.4.3	钢衬玻璃管和管件	288
7.4.4	搪玻璃管和管件	291
7.4.5	金属网聚四氟乙烯复合管材 (HG/T 3705—2003)	297
7.5	非金属材料管	300
7.5.1	橡胶制品	300
7.5.2	塑料制品	304
7.5.3	玻璃钢管	340
7.5.4	玻璃管材	361
7.6	非焊接管件 (无缝管件) (GB/T 12459—2005)	368
7.6.1	等径弯头	368
7.6.2	长半径 90° 异径弯头	369
7.6.3	异径接头	370
7.6.4	等径三通和等径四通	371
7.6.5	异径三通和异径四通	371
7.6.6	管帽	373
7.6.7	管件材料	373
7.7	焊接管件 (有缝管件) (GB/T 13401—2005)	373
7.7.1	弯头	373
7.7.2	异径接头	374
7.7.3	等径三通和等径四通	375
7.7.4	异径三通和异径四通	376
7.7.5	管帽	378
7.7.6	管件材料	378
7.8	锻制管件	378
7.8.1	锻制承插焊管件 (GB/T 14383—2008)	378
7.8.2	锻钢制螺纹管件 (GB/T 14383—2008)	380

## **8 设备管道布置** **383**

8.1	布置图纸要点	383
8.1.1	图纸要求 (HG/T 20546—2009)	383
8.1.2	绘制的要求 (HG/T 20519—2009)	383

8.1.3	内容与标注 .....	384
8.2	设备布置原则 (HG/T 20546—2009) .....	385
8.2.1	布置的要点 .....	385
8.2.2	净距与净空 .....	387
8.2.3	标高与通道 .....	388
8.2.4	操作平台与梯子 .....	389
8.2.5	其他要求 .....	391
8.3	工艺设备布置 (HG/T 20546—2009) .....	393
8.3.1	泵的布置 .....	393
8.3.2	塔的布置 .....	395
8.3.3	卧式容器的布置 .....	396
8.3.4	立式容器的布置 .....	397
8.3.5	装置内管廊的布置 .....	398
8.3.6	外管架的布置 .....	399
8.3.7	静电接地设计规定 .....	400
8.4	管道布置设计 (HG/T 20549—1998) .....	401
8.4.1	设计原则 .....	401
8.4.2	管道的布置 .....	401
8.4.3	阀门的布置 .....	403
8.4.4	非金属管道和非金属衬里管道 .....	404
8.4.5	安全措施 .....	404
8.4.6	阀门操作位置 .....	404
8.4.7	操作维修空间 .....	405
8.5	管架选用设计 .....	410
8.5.1	管道跨距的计算 .....	410
8.5.2	管架的最大间距 .....	411
8.5.3	管架的类型 .....	418
8.5.4	管架的设置 .....	420
8.5.5	典型管架设置 .....	422
8.5.6	管架生根结构 .....	428

**附录** ..... **433**

1	部分计量单位及换算 .....	433
2	几何图形计算公式 .....	433
2.1	平面图形计算公式 .....	433
2.2	立体图形计算公式 .....	436
3	常用工程材料 .....	439
3.1	热轧圆钢、方钢 (GB/T 702—2008) .....	439
3.2	热轧扁钢 (GB/T 702—2008) .....	441
3.3	热轧工字钢 (GB/T 706—2008) .....	442

3.4	热轧槽钢 (GB/T 706—2008)	443
3.5	热轧等边角钢 (GB/T 706—2008)	444
3.6	热轧不等边角钢 (GB/T 706—2008)	447
3.7	型钢焊接及开孔	450
3.8	热轧 H 型钢和部分 T 型钢 (GB/T 11263—2010)	455
3.9	焊接 H 型钢 (YB 3301—2005)	461
4	常用设计资料	473
4.1	金属防腐	473
4.2	管道设计	477
4.3	综合材料余量	478
5	物质性质参数	478
5.1	部分物质溶解度	478
5.2	部分物质溶解热	479
5.3	蒸发潜热及稳定性	480
5.4	脱硫相关数据	480
6	脱硫相关资料	481
6.1	火力发电厂烟气脱硫设计技术规程 (DL/T 5196—2004)	481
6.2	火电厂烟气脱硫工程技术规范 石灰石/石灰-石膏法 (HJ/T 179—2005)	492
6.3	火电厂大气污染物排放标准 (GB 13223—2011)	506
6.4	锅炉大气污染物排放标准 (GB 13271—2014)	509
6.5	火电厂烟气脱硝工程技术规范 选择性催化还原法 (HJ 562—2010)	513
6.6	火电厂烟气脱硝工程技术规范 选择性非催化还原法 (HJ 563—2010)	528
6.7	火力发电厂烟气脱硝设计技术规程 (DL/T 5480—2013)	539

<b>参考文献</b>	<b>561</b>
-------------	------------

## 1



# 烟气脱硫技术

## 1.1 污染与控制

### 1.1.1 燃料的污染

大气是人类赖以生存的最基本的环境要素，它不仅通过自身运动进行热量、动量和水资源分布的调节过程，给人类创造了一个适宜的生活环境，并且阻挡过量的紫外线照射地球表面，有效地保护人类和地球上的生物。但是，随着人类生产活动和社会活动的增加，特别是自工业革命以来，由于大量燃料的燃烧、工业废气和汽车尾气的排放，使大气环境质量日趋恶化。在各类大气污染物中，最重要的是燃煤引起的污染。燃煤二氧化硫和氮氧化物污染控制是目前我国大气污染控制领域最紧迫的任务。

大气污染引起的环境问题主要是全球变暖、臭氧层破坏和酸雨。其中酸雨（或称之为酸沉降）是人为和天然排放的  $\text{SO}_x$  ( $\text{SO}_2$  和  $\text{SO}_3$ ) 和  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$ ) 所引起的。天然源一般是全球分布的，而人为排放的  $\text{SO}_x$  和  $\text{NO}_x$  都具有地区性分布的特征。联合国环境规划署 (UNEP) 的最新估算指出，天然硫排放量占全球硫排放总量的 50%。但局部地区人为排放量占该地区总排放量的 90% 以上，而天然源排放量仅占 4%，其余的 6% 来自其他地区。因此，控制人为  $\text{SO}_x$  和  $\text{NO}_x$  排放非常重要。

煤作为我国的主要一次能源，在电站锅炉、工业锅炉、各种相关工业领域的动力设备以及部分城市居民和广大农村居民的日常生活等的能源消耗中占有很大的比例。特别是近年来随着我国经济的发展，对电的需求大幅度地增加，极大地增加了煤的消耗。由于大量煤在燃烧过程中释放出  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、粉尘等污染物而带来严重的环境问题，也促进了煤的洁净燃烧技术的研究与发展。

### 1.1.2 污染的排放

#### 1.1.2.1 污染的来源

煤、石油、天然气等石化燃料的燃烧会产生二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 和颗粒物等污染物的排放，其中煤燃烧产生的污染最为严重，属不清洁能源，而石油、天然气等经过前处理（如脱硫），燃烧产生的污染较轻，属于清洁能源。目前世界各国的能源结构中

煤的比例已下降到 22.4%，低于天然气的 25.5%。随着工业和经济的发展，我国原煤产量由 1949 年的 3200 万吨增长至 1998 年的 12.95 亿吨，原油产量由 12 万吨增长至 16100 万吨，天然气产量由 700 万立方米增长至 233.3 亿立方米。能源生产的年平均增长率高达 9%。在一次能源消费量及构成中，虽然原煤占能源消费总量的比例与 20 世纪 50~60 年代相比，有较大幅度的下降，但至今仍高达 70% 左右，并且近期内不会有根本性变化。煤为主的能源结构，意味着能源系统的整体效率低下，大量建立在气、液燃料基础上的先进的能源转换和终端利用技术不能适用于煤。煤生产和消费系统既给我国造成了巨大的运输压力，又带来了严重的污染。

### 1.1.2.2 燃煤 SO<sub>2</sub> 的排放

煤是一种低品位的化石能源，我国的原煤中灰分、硫分含量较高，大部分煤的灰分在 25%~28% 之间，硫分含量变化范围较大，从 0.1% 至 10% 不等。1995 年我国商品煤的平均含硫量为 1.13%。煤中的硫根据其存在形态，可分为有机硫、无机硫两大类。有机硫是指与煤的有机结构相结合的硫，如硫醇类化合物 (R-SH)、硫醚 (R-S-R)、二硫醚酸 (R-S-S-R)、噻吩类杂环硫化物和硫醚化合物等。无机硫是以无机物形态存在的硫，通常以晶粒状态夹杂在煤中，如硫铁矿硫和硫酸盐硫，其中以黄铁矿硫 (FeS<sub>2</sub>) 为主，还有少量的白铁矿 (FeS<sub>2</sub>)、砷黄铁矿 (FeAsS)、黄铜矿 (CuFeS<sub>2</sub>)、石膏 (CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O)、绿矾 (FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O)、方铅矿 (PbS)、闪锌矿 (ZnS) 等。此外，有些煤中还有少量的单质状态存在的单质硫。

根据能否在空气中燃烧，煤中硫又可分为可燃硫和不可燃硫。有机硫 (S<sub>o</sub>)、硫铁矿硫 (S<sub>p</sub>) 和单质硫 (S<sub>ei</sub>) 都能在空气中燃烧，属可燃硫。在煤燃烧过程中不可燃硫残留在煤灰中，所以又称固定硫，硫酸盐硫 (S<sub>s</sub>) 就属于固定硫。煤中各种形态硫的总和称为全硫 (S<sub>t</sub>)，即 S<sub>t</sub> = S<sub>s</sub> + S<sub>p</sub> + S<sub>ei</sub> + S<sub>o</sub>。可燃烧硫及其化合物在高温下与氧发生反应生成 SO<sub>2</sub>，其反应可用如下方程式表示：



在空气过剩系数 α = 1.15 时，燃用含硫量为 1%~4% 的煤，标态下烟气中 SO<sub>2</sub> 含量约 3143~10000 mg/m<sup>3</sup>。一般燃煤烟气中 SO<sub>3</sub> 的浓度相当低，即使在贫燃料状态下，生成的 SO<sub>3</sub> 也只占 SO<sub>2</sub> 生成量的百分之几，但它却是决定烟气露点高低的最重要因素。研究表明，当烟气中的 SO<sub>3</sub> 占 0.005% 时，可使烟气露点提高到 150℃ 以上。在富燃料状态下，除生成 SO<sub>2</sub> 外，还会生成一些其他硫的化合物，如一氧化硫 (SO) 及其二聚物 [(SO)<sub>2</sub>]，还有少量的一氧化二硫 (S<sub>2</sub>O)，但由于它们的化学反应能力强，所以在各种氧化反应中仅以中间体形式出现。

我国 SO<sub>2</sub> 排放量与煤消耗量有密切关系，1983~1991 年两者的相关系数达到 0.96。随着燃煤量的增加，燃煤排放的 SO<sub>2</sub> 也不断增长，已超过欧洲和美国，近几年排放量虽有下降，但仍居世界第一位。表 1-1 为我国近几年的 SO<sub>2</sub> 排放量。

表 1-1 我国近年的 SO<sub>2</sub> 排放量

年份	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
排放量/万吨	1564	1495	1622	1685	1795	1825	1396	1397	2346	2090
年份	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
排放量/万吨	1857	1995	1948	1927	2159	2255	2549	2589	2468	2321



有研究表明,按照我国目前的能源政策,2010年一次性能源供应结构中煤仍将分别占68.3%和63.1%。若不采取有效的削减措施,2020年我国SO<sub>2</sub>排放量将达到3500万吨。我国的耗煤大户主要是火电厂,其次是工业锅炉和取暖炉。因此,削减和控制燃煤特别是火电厂燃煤SO<sub>2</sub>污染,是我国能源和环境保护部门面临的严峻挑战。

### 1.1.2.3 燃煤NO<sub>x</sub>的排放

人为排放NO<sub>x</sub>的90%以上来源于煤、石油、天然气等石化燃料的燃烧过程,其中NO约占90%,其余为NO<sub>2</sub>。燃烧过程生成的NO<sub>x</sub>主要有燃料NO<sub>x</sub>、热力NO<sub>x</sub>、快速NO<sub>x</sub>,后两者与燃烧状态有关。我国燃煤电厂在1989年NO<sub>x</sub>的排放量约为130万吨,2000年排放量为290万吨,再加上其他燃煤排放及机动车排放的NO<sub>x</sub>估计2000年我国的NO<sub>x</sub>排放量为1170万吨。

## 1.1.3 控制的策略

在国际公约方面,早在1979年30多个国家以及欧盟签署了长距离跨越国界大气污染物公约,并于1983年生效。根据该协议,1985年21个国家承诺1980~1993年期间,至少削减30%的SO<sub>2</sub>;1994年经26个国家签署,达成了第二次硫化物议定书,对每个国家设定限值,到2000年欧洲在1980年的水平上,可削减45%的SO<sub>2</sub>,到2010年削减51%;1999年在瑞典哥德堡20个国家签署了缓解酸化、富营养化和地面臭氧议定书,对四种主要污染物制定了2010年国家排放限值,据此,欧洲国家在1990年水平上可削减63%的SO<sub>2</sub>、40%的NO<sub>x</sub>及挥发性有机化合物(VOC)、17%的氨(NH<sub>3</sub>)。

为控制大气污染,我国20世纪70年代就开始制定有关环境空气质量标准和大气污染物排放标准,到目前已建立了较为完善的国家大气污染物排放标准体系。在该体系中,按照综合性排放标准与行业标准不交叉执行的原则,如锅炉执行GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》、火电厂执行GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》、炼焦炉执行GB 16171—2012《炼焦化学工业污染物排放标准》等,其他还未有专门标准的污染源排放大气污染物均执行GB 16297—2012《大气污染物综合排放标准》。

## 1.2 洁净煤化工技术

### 1.2.1 煤化工原理

煤炭转化是指用化学方法将煤炭转化为气体或液体燃料、化工原料或产品,主要包括煤炭气化和煤炭液化。作为实现煤炭高效洁净利用的一种途径,煤炭转化不仅广泛用于获取工业燃料、民用燃料和化工原料,也是诸如煤气化联合循环发电、第二代增压流化床联合循环发电(即增压流化床气化-流化床燃烧循环联合发电)以及燃料电池等先进电力生产系统的基础。在煤炭转化过程中,煤中大部分硫将以H<sub>2</sub>S、CS<sub>2</sub>和COS等形式进入煤气。为了满足日趋严格的大气污染物排放标准,并保护燃用或使用煤炭转化产物的设备,需要进行煤气脱硫。与烟气脱硫相比,煤气脱硫对象是气量小、含硫化合物浓度高的煤气,因而达到同样处理效果时,煤气脱硫更加经济,且易于回收有价值的硫分。

### 1.2.2 煤气化技术

煤的气化是指用水蒸气、氧气或空气作氧化剂,在高温下与煤发生化学反应,生成



H<sub>2</sub>、CO 和 CH<sub>4</sub> 等可燃混合气体，称作煤气。煤气可用作城市民用燃料、工业燃料气（工业炉窑、冶金、玻璃等工业的加热炉煤气）、化工原料（制取合成氨、合成甲醇及合成液体燃料的原料气），以及用于煤气化循环发电等。由于除去了煤中的灰分与硫化物，煤气是一种清洁燃料。

根据煤气化的发展过程，煤气化技术可分为三代：第一代煤气化炉型有固体排渣鲁奇（Lurgi）加压移动床，温克勒（Winkler）常压流化床等；第二代气化技术的炉型有德士古（Texaco）熔渣气流床，液态排渣鲁奇炉、西屋干排灰流化床等；第三代气化技术包括催化气化和闪燃氢化热解法等。煤气化过程中，硫主要以 H<sub>2</sub>S 的形式进入煤气。大型煤气厂一般先用湿法脱除大部分 H<sub>2</sub>S，再用干法脱净其余部分。煤气湿法脱除 H<sub>2</sub>S 的主要方法见表 1-2。

表 1-2 煤气湿法脱硫（H<sub>2</sub>S）

脱硫法名称	脱 硫 剂	主要反应
氧化铁法	Fe(OH) <sub>3</sub>	$Fe_2O_3(H_2O)_x + 3H_2S \rightarrow Fe_2S_3(H_2O)_x + 3H_2O$
碳酸钠法	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	$Na_2CO_3 + H_2S \rightarrow NaHCO_3 + NaHS$
砷碱法	砷酸盐	$(NH_4)_4As_2S_5O_2 + H_2S \rightarrow (NH_4)_4As_2S_6O + H_2O$
ADA 法	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	$Na_2CO_3 + H_2S \rightarrow NaHCO_3 + NaHS$
栲胶法	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	$Na_2CO_3 + H_2S \rightarrow NaHCO_3 + NaHS$
氨水法	NH <sub>3</sub>	用含有对苯二酚 [C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub> ] 的氨水洗涤煤气，被吸收的 H <sub>2</sub> S 进入氧化塔，在 C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub> 催化下发生反应： $2H_2S + O_2 \rightarrow 2S + 2H_2O$

干法常用氧化铁脱除 H<sub>2</sub>S，主要反应为：



我国已成功掌握了年产 8 万吨合成氨的德士古炉设计、制造及运行技术；我国引进鲁奇气化炉技术，成功地完成了产气量 160×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/h 的依兰煤气工程和产气量 54×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/h 的兰州煤气工程。但是，我国使用较多的煤气化技术是固定床和二段空气气化炉等。

### 1.2.3 煤液化技术

煤液化是将固体煤在适宜的反应条件下，转化为洁净的液体燃料和化工原料的过程。煤和石油都以碳和氢为主要元素成分，不同之处在于煤中氢元素含量只有石油的一半左右，相对分子质量大约是石油的十倍或更高。如褐煤含氢量为 5%~6%，而石油的氢含量高达 10%~14%。所以，从理论上讲，旨在使煤转化为液态的人造石油的煤炭液化只需改变煤中氢元素的含量，即往煤中加氢使煤中的碳氢比（11~15）降低到接近石油的碳氢比（6~8），使原煤中含氢少的高分子固体物转化为含氢多的液、气态化合物。实际上，由于实现提高煤中含氢量的过程不同，从而产生出不同的煤炭液化工艺，大体分为直接液化、间接液化和由直接液化派生出的煤油共炼三种。但煤液化成本较高，使其应用受到限制，发展缓慢。

### 1.2.4 水煤浆技术

水煤浆（coal water mixture，简称 CWM）是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型煤基流体洁净燃料。它是由煤、水和化学添加剂等经过一定的加工而制成的一种流体燃料。其外观像油，流动性好，储存稳定，运输方便，能用泵输送，雾化燃烧稳定。既保留了煤的燃烧