



节能减排技术丛书

J I E N E N G J I A N P A I



工业锅炉烟气湿法 脱硫实用技术设计

吴安 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

节能减排技术丛书

工业锅炉烟气湿法脱硫 实用技术设计

吴 安 编著



机械工业出版社

本书在收集参考国内、外脱硫技术新资料的基础上,结合作者20多年从事大气污染控制科研设计的经验,简明、扼要地阐述了煤的燃烧和大气污染,锅炉烟气脱硫设计条件的确定,气体吸收概论等有关锅炉烟气脱硫设计的技术基础性知识;比较系统全面地从脱硫设计角度阐述了工业及供热锅炉烟气湿法脱硫实用工艺设计。

根据脱硫设计需要,适当介绍了脱硫装置腐蚀环境和防腐蚀设计,阐述了锅炉烟气脱硫技术及工艺比较选择,介绍了工业锅炉烟气脱硫自控设计方案,阐述了工业锅炉湿法脱硫主要设备和湿法脱硫系统调试。为了对工业及供热锅炉烟气湿法脱硫实用工艺设计有更具体、更清楚的了解,本书对每种实用脱硫工艺都以220t/h热电锅炉湿法脱硫设计方案和投资估算进行了示例。为了脱硫设计方便,本书摘录了有关脱硫设计中常用的主要设备及脱硫设计和运行中相关的技术规定标准规范。

本书对工业及供热锅炉湿法脱硫技术的论述,从基础理论到生产实践、从国外到国内、从技术到经济、从定性到定量、从生产经验数据到数理分析计算、从设计方法到设计示例,内容丰富、层次分明、重点突出、实用性强。本书既可供从事工业及供热锅炉房设计及运行人员、大气污染控制科研及设计人员、环境保护管理人员、环境监测人员、环境保护工程技术公司专业人员参考阅读,也可供高等院校环境工程、热能工程师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工业锅炉烟气湿法脱硫实用技术设计/吴安编著. —北京:机械工业出版社, 2013.9

ISBN 978-7-111-43981-3

I. ①工… II. ①吴… III. ①工业锅炉—煤烟污染—湿法脱硫—烟气脱硫 IV. ①X701.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第212217号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:曲彩云 责任编辑:曲彩云 庞晖

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:赵颖喆 责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2014年2月第1版第1次印刷

169mm×239mm·28.5印张·2插页·637千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-43981-3

定价:86.00元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

网络服务

教材网:<http://www.cmpedu.com>

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

对于人类，具有如此美好的生存环境和丰富资源的地球只有一个。地球环境需要人类珍惜和保护。否则，破坏了地球的生态平衡也就是破坏了人类自己健康生活的要素。

保护环境维持地球的生态平衡是人类生存的需要和持续发展的需要，是人类高度文明与智慧的表现，也是人类的共同愿望和义不容辞的责任。可是随着经济的发展，大量燃料燃烧后的烟气排向大气，产生了严重的大气污染和环境问题。当前迫切需要解决和改善的重要环境问题是：

1. 全球气候变暖

由于CO₂的大量排放，导致全球气候变暖。在过去的一个世纪里全球表面平均温度已上升0.3~0.6℃，全球海平面上升了10~25cm。目前在地球大气中的二氧化碳含量已由工业革命（1750年）之前的280ppm[⊖]增加到近360ppm。1996年政府间气候变化小组发表的评估报告表明：如果世界能源消费的格局不发生根本变化，那么到21世纪中叶，大气中的二氧化碳含量将达到560ppm，全球平均温度可能上升1.5~4℃。同时可能出现的影响和危害有：一是海平面上升；二是影响农业和自然生态系统；三是加剧洪涝、干旱及其他气象灾害；四是影响人类健康。

2. 臭氧层破坏和损耗

自1985年南极上空出现臭氧层空洞以来，地球上空臭氧层被损耗的现象一直有增无减。到1994年，南极上空的破坏面积已达2400万km²。大气中的臭氧含量仅一亿分之一，分布在离地面20~30km的平流层中，它可以有效地挡住来自太阳的紫外线侵袭。有害紫外线的增加会使皮肤癌和白内障患者增加，损坏人的免疫力，使传染病增加；其次是破坏生态系统。

3. 酸雨污染

酸雨，也被称为空中的死神。其是指酸性物质以湿沉降或酸性颗粒物的形式，从大气转移到地面上。酸雨中绝大部分是硫酸和硝酸，主要来源于人类使用化石燃料，向大气排放了大量的二氧化硫和氮氧化物。欧洲是世界上一大酸雨区，美国和加拿大东部也是一大酸雨区。亚洲的酸雨区主要集中在东亚，其中我国南方是酸雨严重的地区。

⊖ 1ppm = 10⁻⁶。

酸雨，通常指 pH 低于 5.6 的降水。其危害主要表现为损害生物和自然生态系统，腐蚀建筑材料及金属结构。2008 年，我国二氧化硫排放量为 2321 万 t。我国目前每年因酸雨和二氧化硫污染，对生态环境损害和人体健康影响造成的经济损失在 1100 亿元人民币左右。即每吨二氧化硫造成的经济损失约 4740 元。

目前我国在用的工业锅炉有 60 万台左右，工业炉窑有 12 万台左右。年耗煤 4 亿 t 左右，约占全国煤炭消耗量的 1/4。年排放二氧化硫 1000 万 t，约占全国二氧化硫排放总量的 45%。

目前，我国对电站锅炉、工业锅炉和炉窑都发布了烟气脱硫除尘排放标准，有 GB 13223—2003《火电厂大气污染物排放标准》，GB 13271—2001《锅炉大气污染物排放标准》。此外，还有一些地方标准，如北京市发布的北京市地方标准，DB 11/139—2007《锅炉污染物综合排放标准》。这表明我国已经严格按相关国家排放标准来控制电站锅炉与工业锅炉和工业炉窑烟气污染物排放。凡新建锅炉或在用锅炉和改建扩建锅炉都必须安装脱硫装置，这对控制 SO₂ 污染起到了强制性作用，并推动锅炉烟气脱硫进入一个新阶段。自 2001 年，我国开展电站脱硫和工业锅炉脱硫以来，上了一大批脱硫项目。这对削减 SO₂ 排放量收到了明显效果。在 2009 年，我国政府工作报告中明确公布了 2008 年 SO₂ 排放量比 2007 年下降了 5.95%。

2009 年 3 月 6 日国家环境保护部发布了《工业锅炉及炉窑湿法烟气脱硫工程技术规范》(HJ 462—2009)，更好地规范了工业锅炉脱硫工程设计。该规范适用于蒸发量 $\geq 20\text{t/h}$ (14MW) 或蒸发量 $< 400\text{t/h}$ 的燃煤热电锅炉及相当烟气量的炉窑脱硫工程。这个适用范围涵盖锅炉吨位跨度较宽，从一般的 20t/h 工业锅炉至相当于 10 万 kW 火力发电厂锅炉 (410t/h 电站锅炉)。所以在设计脱硫系统的工艺流程和自控水平时，应该区别对待。对于 ≤ 35 (40) t/h 的锅炉，采用相对简化的脱硫系统；对于接近 410t/h 的锅炉采用较完备的脱硫系统。

为了更好地促进工业锅炉与工业炉窑烟气脱硫，作者在总结以往工业锅炉烟气脱硫设计工作基础上，广泛收集国内外资料，编写了本书。

本书较系统地阐述了烟气脱硫技术设计中用到的基础理论及计算方法，锅炉烟气湿法脱硫实用技术，烟气脱硫工艺参数及自动控制，烟气脱硫防腐材料，烟气脱硫常用脱硫塔，烟气脱硫系统主要设备。此外，介绍了烟气脱硫系统的调试和脱硫工艺技术经济比较与选择。

作者希望能使读者比较系统地了解工业锅炉烟气湿法脱硫实用技术，了解烟气湿法脱硫工艺和自控设计，为做好工业及供热锅炉脱硫技术的经济比

较与选择,做好烟气脱硫技术设计提供一些必要、实用的技术资料。并希望
对工业及供热锅炉烟气脱硫工作能有所帮助。

本书摘编了部分对于脱硫设计常用的资料,在此向这些资料的编著者表
示感谢。

本书中有关自控方面设计摘编了李国祥、周晴同志在某个项目设计中的
部分说明。在此表示深谢!

由于水平所限,书中存在的缺失和不足之处恳请读者批评指正。

编者

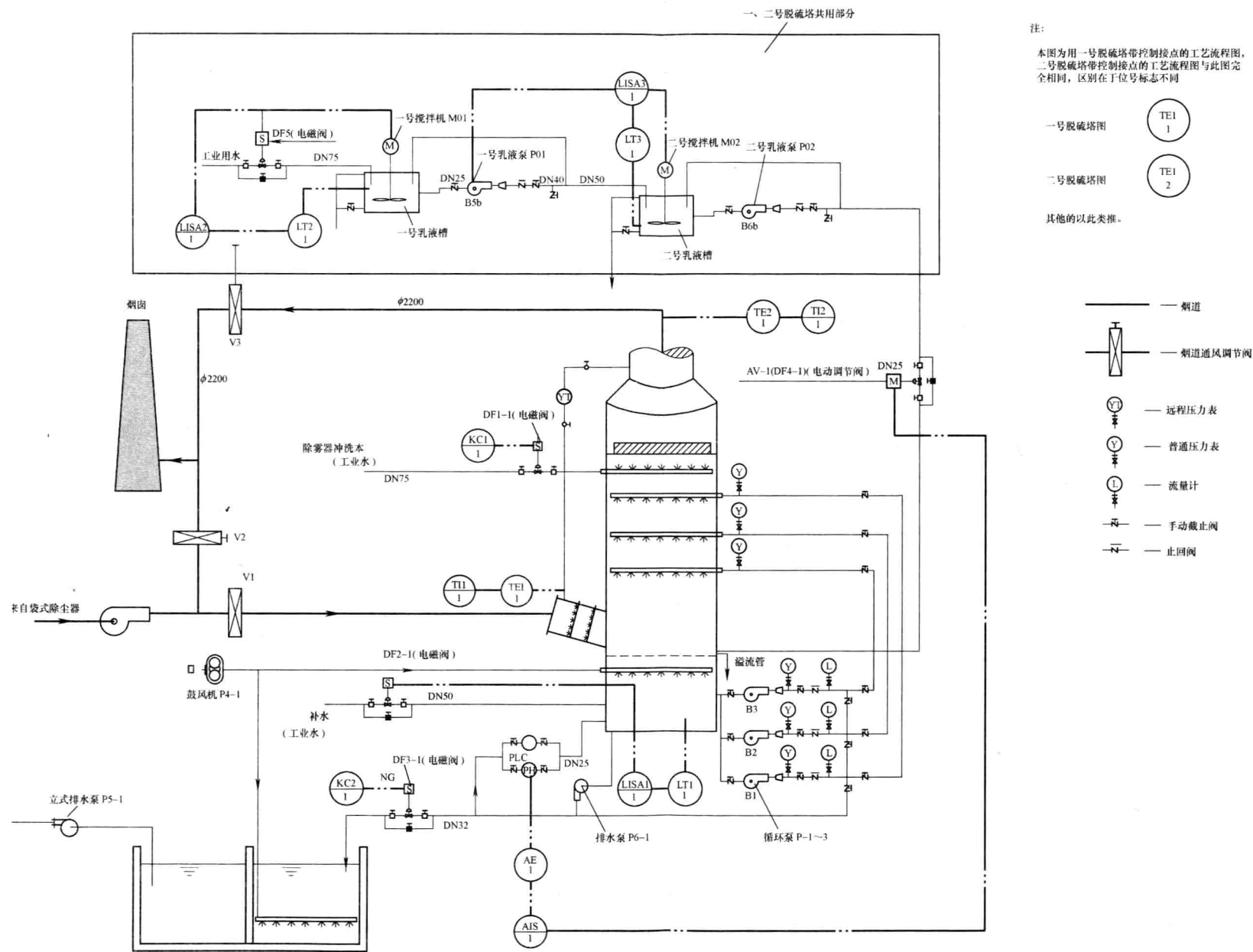


图 4-43 带控制转点的工艺流程图

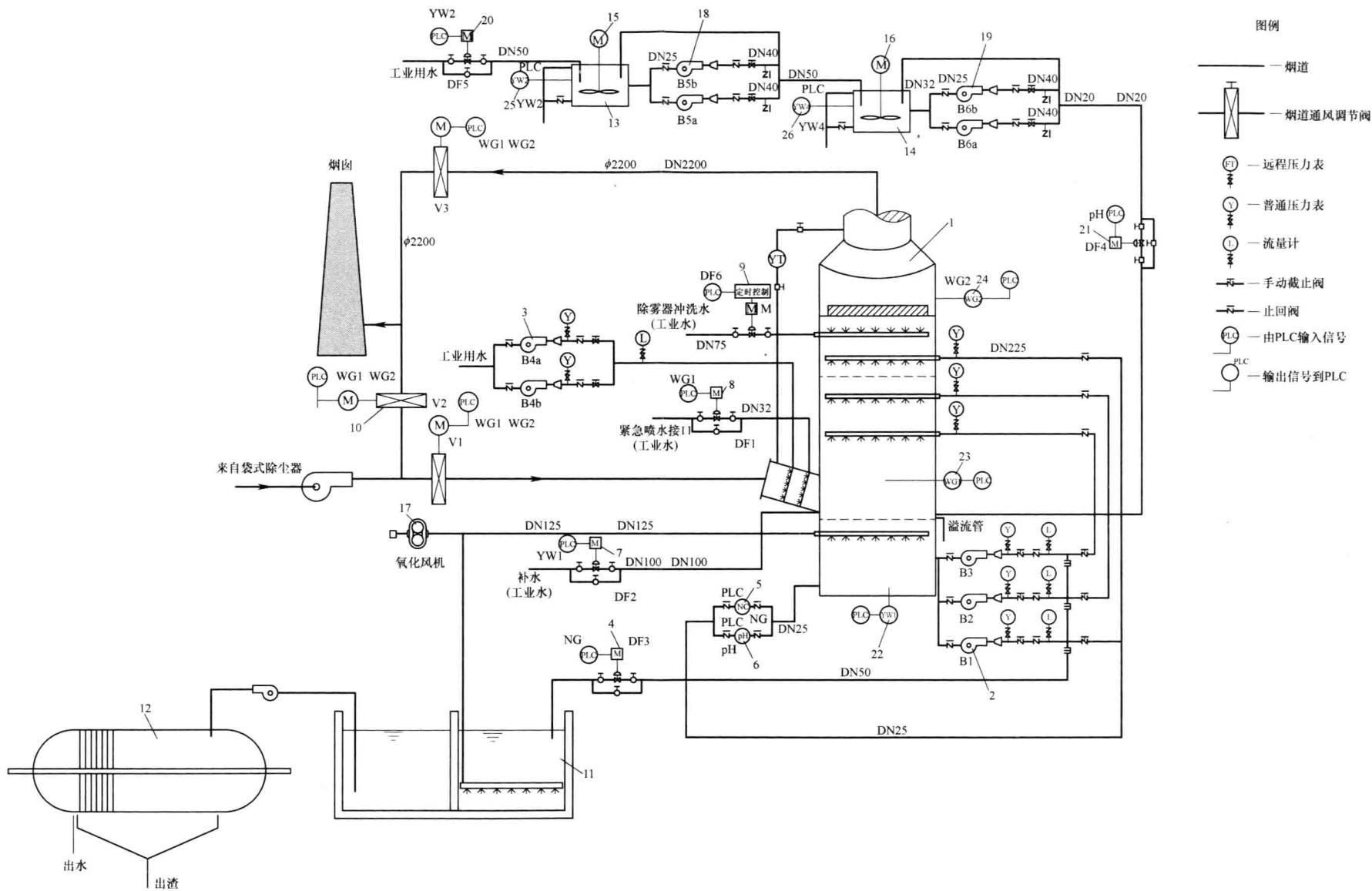


图 8-1 脱硫系统控制流程图

- 1—脱硫塔 2—循环泵 3—预冷喷淋泵 4—电动调节阀 5—浓度传感器 6—pH 值传感器 7、8—电磁阀 9—定时控制器 + 电磁阀 10—蝶阀 11—氧化缓冲池
 12—板框压滤机 13—MgO 熟化池 14—MgO 浆液池 15、16—搅拌装置 17—氧化风机 18—脱硫剂中间输送泵 19—脱硫剂供给泵 20—电磁阀 21—电动调节阀
 22—液位传感器 (YW1) 23—温度传感器 (WG1) 24—温度传感器 (WG2) 25—液位传感器 (YW2、YW3) 26—液位传感器 (YW4、YW5)

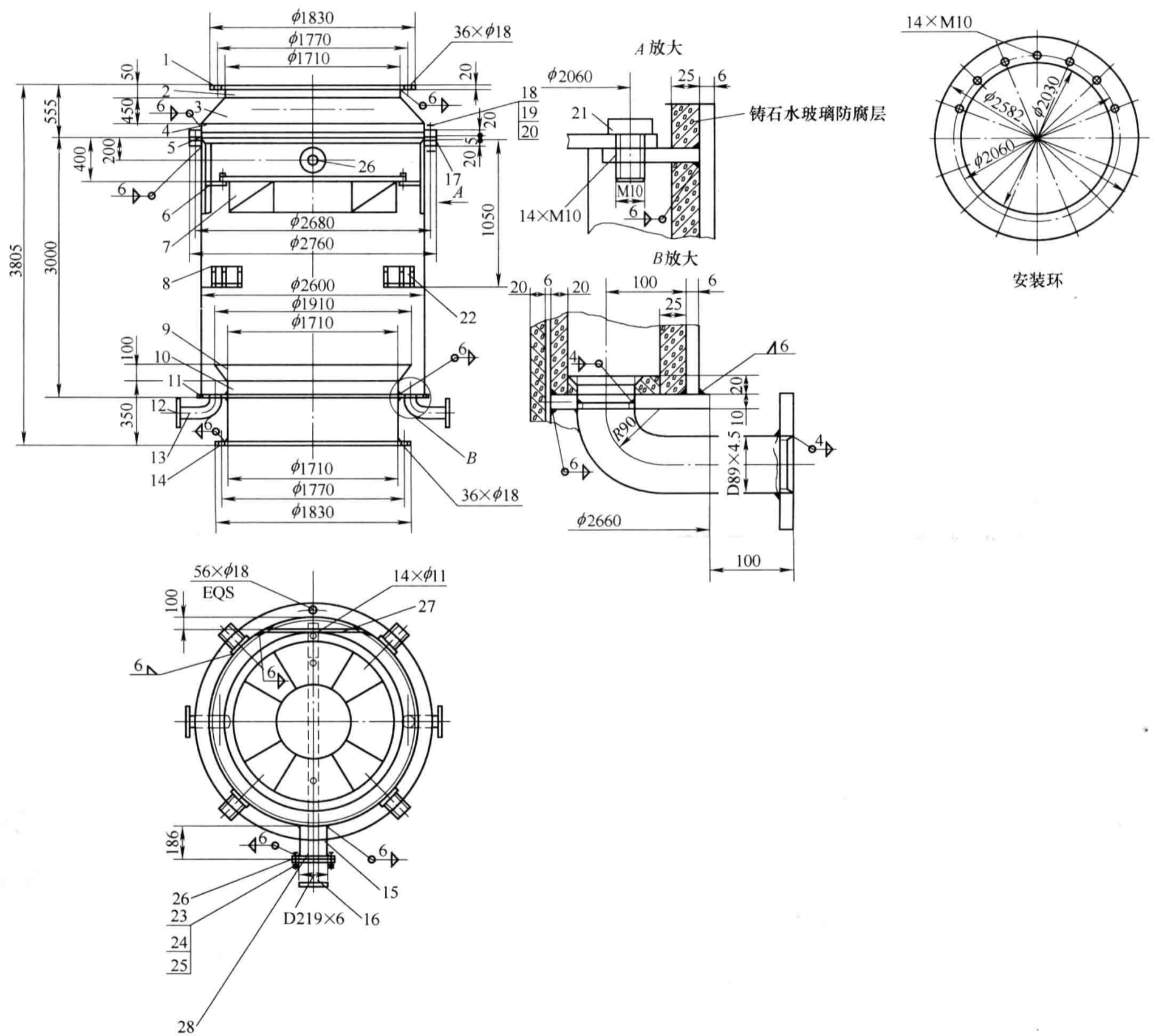


图 9-25 旋流叶轮除雾器施工图

- 1—进烟法兰 2—进口直段 3—锥体 4—直段 5—法兰 6—安装环 7—旋流器 8—脱水筒 9—导烟锥 10—出烟管 11—底板
 12、26—平焊钢法兰 13—无缝钢管 14—出烟法兰 15—反冲安装口 16—反冲管 17、28—垫片
 18、21、23—螺栓 19、24—螺母 20、25—垫圈 22—支架 27—支梁

目 录

前言

第 1 章 煤的燃烧与大气污染	1
1.1 煤的组成、成分分析及其分类	1
1.1.1 煤的元素分析	1
1.1.2 煤的工业分析	1
1.1.3 煤的成分基准及换算	2
1.2 煤燃烧产生的污染物	4
1.3 煤的燃烧和烟气组成成分	5
1.3.1 碳的燃烧	5
1.3.2 氢的燃烧	6
1.3.3 硫的燃烧	6
1.3.4 煤燃烧的理论空气量	6
1.3.5 煤燃烧产生的烟气量	7
1.3.6 空气和烟气的焓	9
1.4 工业及热水锅炉烟尘原始排放浓度	10
第 2 章 锅炉烟气脱硫设计条件	12
2.1 脱硫设计常用的标准及规范	12
2.2 脱硫设计的原始资料	12
2.3 脱硫装置设计要求	13
2.4 脱硫装置设计条件	13
2.5 锅炉排烟的 SO ₂ 含量	15
2.6 锅炉排烟的 NO _x 含量	15
2.7 脱硫装置的设计脱硫效率	16
2.8 烟气含湿量	16
2.9 烟气露点	16
2.10 烟气的升温和降温	17
第 3 章 气体吸收概论	20
3.1 气体扩散	20
3.1.1 扩散速率方程式	20
3.1.2 扩散系数	21
3.2 气体吸收原理	21
3.2.1 亨利定律	22
3.2.2 双膜理论	22
3.2.3 传质速率方程式	23
3.2.4 脱硫塔传质单元数	24

3.2.5 脱硫塔吸收区高度	26
第4章 锅炉烟气湿法脱硫实用工艺设计	28
4.1 湿式石灰法脱硫	28
4.1.1 基本原理与化学反应式	28
4.1.2 湿式石灰法脱硫工艺流程	30
4.1.3 脱硫工艺流程说明	32
4.1.4 湿式石灰法脱硫工艺参数	34
4.1.5 脱硫产物的用途	37
4.1.6 脱硫过程水平衡	37
4.1.7 湿式石灰法脱硫废水处理	42
4.1.8 湿式石灰法脱硫特点	43
4.1.9 湿式石灰法脱硫设计注意事项	44
4.1.10 湿式石灰法烟气脱硫设计方案及投资估算	46
4.2 湿式石灰石法脱硫	55
4.2.1 基本原理与化学反应式	56
4.2.2 湿式石灰石法脱硫工艺流程	57
4.2.3 湿式石灰石法脱硫工艺参数	59
4.2.4 脱硫产物的用途	60
4.2.5 湿式石灰石法脱硫特点	60
4.2.6 湿式石灰石法脱硫设计注意事项	60
4.2.7 湿式石灰石法烟气脱硫设计方案及工程投资估算	61
4.3 湿式氧化镁法脱硫	67
4.3.1 基本原理与化学反应式	67
4.3.2 湿式氧化镁法脱硫工艺流程	68
4.3.3 脱硫系统组成	68
4.3.4 湿式氧化镁法脱硫工艺参数	70
4.3.5 湿式氧化镁法脱硫废水及处理方案	72
4.3.6 湿式氧化镁法脱硫技术特点	74
4.3.7 湿式氧化镁法脱硫设计注意事项	74
4.3.8 湿式氧化镁法烟气脱硫除尘方案及工程投资估算	76
4.4 钠碱法脱硫	81
4.4.1 基本原理与化学反应式	82
4.4.2 钠碱法脱硫工艺流程	83
4.4.3 亚硫酸钠法	84
4.4.4 钠碱法脱硫工艺参数	85
4.4.5 钠碱法脱硫废水量及处理方案	85
4.4.6 钠碱法脱硫技术特点	88
4.4.7 钠碱法脱硫设计注意事项	89
4.4.8 钠碱法锅炉烟气脱硫方案及投资估算	89
4.5 双碱法脱硫	95

4.5.1	基本原理与化学反应式	96
4.5.2	双碱法工艺流程	96
4.5.3	双碱法脱硫工艺参数	97
4.5.4	双碱法中钠碱的再生回用	98
4.5.5	双碱法中钠碱的损耗	98
4.5.6	双碱法脱硫废水处理	99
4.5.7	双碱法脱硫技术特点	101
4.5.8	双碱法脱硫设计注意事项	102
4.5.9	双碱法烟气脱硫方案及投资估算	103
4.6	湿式氨法脱硫工艺	110
4.6.1	基本原理与化学反应式	110
4.6.2	湿式氨法脱硫工艺流程及参数	111
4.6.3	湿式氨法脱硫的 pH 值控制	115
4.6.4	湿式氨法脱硫产物的用途	115
4.6.5	湿式氨法脱硫工艺技术特点	116
4.6.6	湿式氨法脱硫设计注意事项	116
4.6.7	湿式氨法烟气脱硫设计方案及投资估算 (氨-亚硫酸铵法脱硫工艺)	118
4.7	工业锅炉简易湿法脱硫	125
4.8	工业及供热锅炉湿法烟气脱硫设计实例	128
4.8.1	2×40t/h 锅炉湿式氧化镁法烟气脱硫设计	128
4.8.2	2×35t/h 锅炉烟气钠碱法脱硫设计	138
第 5 章 锅炉烟气脱硫技术简介及工艺比较和选择		144
5.1	烟气脱硫技术简介	144
5.1.1	煤燃烧前脱硫技术	144
5.1.2	煤燃烧中脱硫技术	144
5.1.3	煤燃烧后烟气脱硫技术	144
5.1.4	常用脱硫工艺和性能	152
5.2	锅炉烟气脱硫工艺的比较和选择	153
5.2.1	湿式石灰石法脱硫工艺	153
5.2.2	双碱法脱硫工艺	154
5.2.3	湿式氧化镁法脱硫工艺	154
5.2.4	循环流化床烟气脱硫方案	156
5.2.5	双碱法、石灰石法、氧化镁法经济指标对比	156
5.3	脱硫工艺方案比选意见	158
第 6 章 脱硫剂选择和浆液制备		159
6.1	脱硫剂的选择	159
6.1.1	脱硫剂价格和比价	159
6.1.2	脱硫剂产地	159
6.1.3	脱硫剂的脱硫工艺特性	159
6.2	脱硫剂制备流程	161

6.2.1	全封闭脱硫剂制备系统	162
6.2.2	半封闭脱硫剂制备系统	162
6.2.3	简易脱硫剂制备系统	163
6.3	脱硫剂浆液制备设计条件	164
6.3.1	脱硫剂用量	164
6.3.2	脱硫剂储仓	164
6.3.3	搅拌槽(池)	165
6.4	脱硫剂浆液制备设计示例	167
第7章	锅炉烟气湿法脱硫常用脱硫塔	170
7.1	空心喷雾脱硫塔(洗涤塔、吸收塔)	170
7.2	多孔板塔(无溢流多孔板塔、泡沫塔)	172
7.3	文丘里洗涤塔	172
7.4	喷雾、多孔板塔	175
7.5	旋流板塔	175
7.6	液柱塔	176
7.7	其他脱硫塔	177
7.8	常用脱硫塔性能	178
第8章	锅炉烟气湿法脱硫自动控制设计	179
8.1	控制系统概述	179
8.2	自控设计采用的标准及规范	180
8.3	自控设计范围和内容	180
8.4	自动控制回路	180
8.5	测量仪表选型	181
8.6	烟气排放连续监测系统(CEMS)	181
8.7	工业锅炉脱硫自动控制设计技术方案示例	181
8.7.1	130t/h 供热锅炉脱硫自控和电气方案设计	181
8.7.2	锅炉烟气脱硫浆液制备自控设计	183
第9章	工业锅炉烟气湿法脱硫主要设备	187
9.1	脱硫增压风机	187
9.2	脱硫循环泵	189
9.3	罗茨鼓风机	191
9.4	喷雾喷嘴	191
9.4.1	喷嘴的性能	192
9.4.2	喷雾的覆盖率 f_p	195
9.4.3	喷嘴的固定方法	195
9.4.4	喷嘴的材料	196
9.5	除雾器	196
9.6	水力旋流器	206
9.7	真空带式过滤机	209
9.8	板框压滤机	210

9.9	离心分离机	212
9.10	烟气加热器	213
9.11	烟气挡板	216
9.12	烟道	218
9.13	管道和阀门	220
第10章	脱硫系统烟道设计及烟气升温	222
10.1	烟道设计	222
10.2	阻力计算	224
10.3	脱硫系统增压风机设计示例	227
10.4	增压风机风压 H_{zy} (Pa) 和风量 Q_{zy} (m^3/h) 的确定	231
10.5	脱硫排烟加热方案	231
第11章	烟气脱硫防腐蚀设计及材料	236
11.1	烟气脱硫装置的腐蚀	236
11.2	腐蚀环境划分和材料选用	237
11.3	常用非金属防腐材料	238
11.4	常用金属防腐材料	242
第12章	锅炉烟气湿法脱硫系统调试	247
12.1	脱硫系统调试任务与目的	247
12.2	系统调试的一般规定	247
12.3	调试运行组织工作	248
12.4	系统调试	255
12.5	脱硫系统运行与性能测试	257
第13章	常用设计资料	259
13.1	锅炉燃煤资料及燃烧数据	259
13.2	蒸汽及热水、烟气的热力性质	262
13.3	常用化合物及脱硫剂	272
13.4	常用物理单位换算	275
13.5	烟风道异径管局部阻力系数	283
13.6	各国不锈钢耐酸钢牌号对照	292
13.7	常用数据	295
13.7.1	常用钢材的许用应力	295
13.7.2	常用材料的力学性能、物理性能	303
13.8	常用材料	307
13.8.1	型材	307
13.8.2	管材	319
13.8.3	钢塑复合管	344
13.8.4	ABS 塑料管	345
13.8.5	板材	346
13.9	常用设备	347
参考文献		443

第 1 章 煤的燃烧与大气污染

1.1 煤的组成、成分分析及其分类

煤是由有机物和无机物组成的复杂碳氢固体燃料。煤是远古植物因地壳变动被埋入深层地下，长期处在温度和压力较高的环境下，植物中纤维木质素脱水，含氧量减少，碳质增加，逐渐形成化学稳定、含碳量高的固体化合物。由于埋入地下的深度和时间不同，以及地质作用的强弱不同，形成褐煤、烟煤和无烟煤三大类。

根据用途，将用于炼焦、锻造和化工的燃料称为工艺燃料，用于锅炉的燃料称为动力燃料。

1.1.1 煤的元素分析

全面测定煤中全部化学成分的分析叫做元素分析。煤中所含化学元素达 30 多种，一般将煤中不可燃烧的物质计入灰分，所以煤的元素分析成分包括碳、氢、氧、氮、硫、灰分和水分，各化学元素成分用质量分数表示，即

$$C + H + O + N + S + A + M = 100\% \quad (1-1)$$

碳是煤中含量最多的可燃元素，发热量大，纯碳的发热量为 $32.7 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ 。煤中的碳一部分与氢、氧、氮和硫结合成挥发性有机物，其燃点较低。而对于呈单质状态的碳，其燃点较高，不易着火和燃尽。

氢在煤中含量较少，一般为 3% ~ 6%（质量分数），氢的发热量最高为 $120 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ ，氢的燃点低，容易着火。

煤中的氧和氮是不可燃物质，其含量较少。但氮在高温时易生成氮氧化物 NO_x ，它是污染大气的酸性气体，也是形成酸雨的有害物质。

硫在煤中含量也很少，通常以有机硫、硫化铁、硫酸盐形式存在。前两种硫化物可燃，称为可燃硫；后一种硫酸盐则归入灰分，称为固定硫。计算烟气中的硫氧化物 SO_x 时，可近似采用全硫分来代替可燃硫。硫的燃烧产物 SO_2 和 SO_3 是酸性气体，有害于人体健康，也是产生酸雨的元凶，能腐蚀金属设备和建筑物，也会破坏树木、植被和农作物，是当前大气污染控制的主要污染物之一。

1.1.2 煤的工业分析

在实验室中对煤样进行分析，得出水分、挥发分、固定碳和灰分这四种成分的质量分数，称为工业分析。

将自然干燥后的煤样取 1g 左右放入预先加热至 $(145 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的干燥箱中干燥 1h 后，

试样质量减轻的量占原质量的百分数即为空气干燥基水分的质量分数。

将失去水分的煤样在隔绝空气的条件下放入 920℃ 电炉中加热 7min，放入干燥器内冷却至室温后称重，可得出空气干燥基挥发分的质量分数，即

$$V_{ad} = \frac{G - G_1}{G} \times 100\% - M_{ad} \quad (1-2)$$

式中 G ——原煤样质量 (g)；

G_1 ——加热后剩余质量 (g)；

M_{ad} ——空气干燥基水分的质量分数 (%)。

在加热过程中，煤中有机物质分解而析出的气体物质是挥发分，它主要是由各种碳氢化合物、氢、一氧化碳、硫化氢等可燃气体组成，另外还有少量的氧、二氧化碳、氮等不可燃气体。

由于煤的碳化程度不同，其挥发分的析出温度不相同，挥发分的成分及含量也不同。由于挥发分燃点低，容易着火，因此对锅炉运行影响较大，是煤的重要特性，挥发分的含量常作为煤分类的重要依据。

煤在失去水分和挥发分后就成为了焦炭，它包括固定碳和灰分。将煤样放在高温炉中，按规定升温到 $(815 \pm 10)^\circ\text{C}$ ，并加热 1h，冷却至室温后称重，剩余质量占原煤样质量的百分数即为空气干燥基灰分的质量分数。将原煤样中水分、灰分、挥发分扣除后，即为空气干燥基固定碳的质量分数。

1.1.3 煤的成分基准及换算

由于煤中的水分和灰分易受外界条件的变化而变化，单位质量的煤中其他可燃物质的质量百分数也随之而变。因此，根据煤存在的条件或根据需要而规定的“成分组合”称为基准。

1. 常用基准

(1) 收到基 (原应用基) 以收到状态的煤为基准，计算煤中全部组成成分的组合称为收到基，其中包括全部水分，收到基以下角标 ar 表示。它相当于原来的应用基 y 。

$$C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} + A_{ar} + M_{ar} = 100\% \quad (1-3)$$

(2) 空气干燥基 (原分析基) 煤样在实验室规定的温度下自然干燥失去外部水分后，其余的成分组合是空气干燥基，以下角标 ad 表示。它相当于原来的分析基 f 。

$$C_{ad} + H_{ad} + O_{ad} + N_{ad} + S_{ad} + M_{ad} = 100\% \quad (1-4)$$

(3) 干燥基 以假想无水状态的煤为基准，以下角标 d 表示，原表示符为 g 。由于已不受水分的影响，灰分含量相对比较稳定，可以用于比较两种煤的含灰量。

$$C_d + H_d + O_d + N_d + S_d + A_d = 100\% \quad (1-5)$$

(4) 干燥无灰基 (原可燃基) 以假想无水、无灰状态的煤为基准，以下角标