

火电厂 湿法烟气脱硫 技术手册

周至祥 段建中 薛建明 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

火电厂 湿法烟气脱硫 技术手册

周至祥 段建中 薛建明 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书在广泛收集国内外烟气脱硫最新技术资料,结合作者十多年管理电厂烟气脱硫装置实际经验的基础上,较为全面、系统地阐述了湿法石灰/石灰石烟气脱硫技术以及与其有关的专业知识。

本书分为三篇,第一篇阐述了烟气脱硫的原理和方法;脱硫系统重要设计参数、工艺变量和相互关系以及它们对系统性能的影响;系统主要设备的作用、特性和主要参数;脱硫腐蚀环境和材料选择;系统可靠性;化学监测以及脱硫工程施工、调试和性能考核等方面的内容。第二篇介绍了烟气脱硫主要设备的类型、用途、主要性能参数和布置方式;在目前工艺水平下主要设备在设计 and 选择时应考虑的问题以及适用的结构材料。第三篇详细讨论了烟气脱硫工艺选择原则;介绍了工艺的技术经济评估体系、评估指标和评估方法;工程标书的技术经济评估方法;列举了7个已投运的脱硫工程实例,供选择烟气脱硫工艺时参考。此外,还在附录中汇集了国内目前已颁布的与烟气脱硫有关的主要标准、规程和规范,以便读者查阅。

本书涉及了烟气脱硫技术的各个方面,内容丰富,层次分明,综合性强,结合了工程实践经验,有助于从事烟气脱硫工作的工程技术人员在理论和实践上获得更多的信息,是国内第一本详细介绍湿法石灰/石灰石烟气脱硫技术的工具书,具有较强的实用性和参考价值。

本书适用于从事火电厂烟气脱硫、其他工业废气治理、环境监测、工业管理、科研等部门的工程技术人员阅读,也可供高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂湿法烟气脱硫技术手册/周至祥,段建中,薛建明编著. —北京:中国电力出版社,2006

ISBN 7-5083-4125-2

I. 火... II. ①周...②段...③薛... III. 火电厂-湿法-烟气脱硫-技术手册 IV. X773.013-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 009820 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006年6月第一版 2006年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 44.5印张 1124千字

印数 0001—3000册 定价 78.00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)

大气是参与水和各种元素循环的重要环境因素，在保持地球热平衡方面及保护地球上生物体免受过强宇宙射线、紫外线照射方面起着重要的作用，是人类赖以生存的最基本的环境要素。但是，随着社会经济的发展，城市化和工业化进程的加速，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，它不但破坏自然生态平衡，还直接威胁人类健康乃至生命。大气污染已被列为全球性十大环境问题之首。而在全球范围内普遍发生的大气污染物中，按先后顺序考虑治理的大气污染物是 SO_2 、可吸入颗粒物、 O_3 、 NO_x （ NO 和 NO_2 ）、铅、 CO_x （ CO 和 CO_2 ）、石棉及反应性烃。 SO_2 被列为首位。据联合国环境规划署（UNEP）的最新估算指出，天然硫排放量占全球硫排放总量的 50%。但在局部地区，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 6% 来自其他地区。众所周知，人为源和天然源排放的 SO_x 和 NO_x 是形成酸雨或称酸沉降的“元凶”。因此，控制人为 SO_x 和 NO_x 排放的重要性是显而易见的。

随着对酸沉降和 SO_2 污染的成因和危害的深入了解和研究，各国人民和政府已认识到大气污染的严重性和控制大气污染的紧迫性。自 20 世纪 70 年代初日本和美国率先实施控制 SO_2 排放战略以来，许多国家相继制定了严格的 SO_2 排放标准和中长期控制战略，加速了控制 SO_2 排放的步伐。

日本由于国土狭小，人口密度高，对环境污染的承受能力小，因而对环境污染问题非常敏感。二次大战以后，在 1955 ~ 1973 年期间，日本经过短时间的恢复，经济高速发展，能源消耗急剧上升，加之人口构成的城市化，环境污染的受害对象大为增加，公害事件频繁发生，从而引起社会各界人士的关注，要求对环境污染问题立法。1962 年 6 月日本制定了《煤烟控制法》，以后对该法案进行了多次修改，使 SO_2 排放标准日益严格。由于日本从 1963 年就开始对 SO_2 污染问题采取对策，积极治理，大约经历了 17 年的时间，即到 1979 年前后，成功地实施了对以粉尘和硫氧化物为主要对象的工业污染的控制，取得了污染防治的阶段性胜利。

日本是应用烟气脱硫（Flue Gas Desulfurization, FGD）技术最早的国家，从 1962 年开始研究、开发 FGD 工艺及设备，20 世纪 70 年代起大规模实施应用，1970 ~ 1975 年发展最快，到 1996 年 4 月，日本累计建设 FGD 装置 2228 套。火电厂 FGD 工艺主要采用石灰/石灰石—石膏法，除少数燃用低硫煤（0.2% ~ 0.3%）机组外，其余燃煤发电机组都采用了 FGD 技术。

1970 年以前，美国 SO_2 排放量随着经济的发展逐年增长，到 1970 年，全国 SO_2 人均排放量达到 143.4kg/年，单位国土面积的 SO_2 排放量为 3.0 t/km²，均居历史最高值，全国大范围内已形成酸雨，其中火力发电，特别是燃煤锅炉是重要的污染源之一，环境问题引起公众的普遍关注，形成了所谓的“环境觉醒运动”。1970 年 1 月 1 日，当时的美国总统尼克松签

署了《国家环境政策法》。随后，于1970年12月成立了美国环保局（EPA）。1970年的最后一天，《清洁大气法》正式通过，成为美国历史上较为完整的第一部有关空气污染的法规。《清洁大气法》使美国用于大气污染治理的费用逐年增加，同时也使大气质量不断得到改善。1977年修改了1970年通过的《清洁大气法》，开始着手治理老污染源。1990年11月15日美国国会再次通过对《清洁大气法》的修正案，修正案的内容比1970年和1977年的更为广泛，它引入了酸雨计划，主要控制火电厂的SO₂排放，并提出了每年的削减目标。由于实施了一系列控制SO₂排放的政策，从1970年到1974年，美国SO₂排放总量约下降了10%，1975年到1987年SO₂排放总量又下降了19%，从1975年的2560万t下降到1987年的2070万t。到2000年，美国全国SO₂排放总量仅约为1000万t，酸雨区范围以及酸雨强度也大幅度下降。

我国是一个发展中国家，是世界上最大的煤炭生产和消费国。在能源结构上原煤占能源消费总量的70%，是世界上少数几个以煤为主要能源的国家之一。我国在取得经济高速发展的同时，也正承受着巨大的资源和环境压力，SO₂排放量多年都在2000万t上下，2004年排放量达到2255万t，目前已居世界第一位。在20世纪80年代，我国酸雨主要发生在以重庆、贵阳和柳州为代表的西南地区，酸雨面积约为170万km²。到20世纪90年代中期，酸雨已发展到长江以南、青藏高原以东及四川盆地的广大地区，华东沿海地区也成为我国主要酸雨地区，华北、东北部分地区也频频出现酸性降水，降雨年平均pH值低于5.6的区域面积已占全国国土面积的40%左右，我国酸雨污染迅速发展的态势已到了非治理不可的程度。为了控制大气污染，我国从20世纪70年代开始制定有关环境空气质量标准、大气污染排放标准。1982年国务院颁布了《征收排污费暂行办法》，已包含了SO₂超标收费的内容。1987年9月颁布了《大气污染防治法》，1995年8月全国人大常委会通过了修订的《中华人民共和国大气污染防治法》，2000年4月29日通过了修订的《大气污染防治法》，2002年11月编制了《“两控区”酸雨和二氧化硫污染防治“十五”计划》，2003年1月1日，我国开始实施《洁净生产促进法》。由此可看出，我国政府为遏制酸雨和SO₂污染进行了积极的努力。

众所周知，我国能源资源以煤炭为主。煤炭消费分为工业用煤和生活用煤两个部分。工业用煤主要集中在电力、建材、钢铁和化工行业。其中电力行业是我国用煤大户，2004年我国煤消费量为18亿t，其中火电厂（含供热）燃煤量约8.5亿t，占全国煤炭消费的47%。同年全国SO₂排放量达到2255万t，其中火电厂SO₂排放量约为1400万t，占全国排放总量的62%。预计2010年全国煤炭消费量将增到24亿t左右，其中火电厂燃煤量约14亿t，若不采取有效措施SO₂产出量将达到约3000万t。因此，削减火电厂的SO₂排放成为我国控制SO₂排放总量的重点。许多地区已开始实施脱硫计划并建成投运了一批脱硫装置，到2004年底我国累计建成并投产的脱硫机组容量约为26.8GW。截止到2005年8月，在建和已签约火电厂项目已超过60GW。显然，未来5~10年是我国广泛应用和飞速发展FGD技术的重要时期。

迄今为止，国内外已开发了数百种FGD技术，其中湿法石灰石-石膏FGD技术最为成熟、最为可靠且应用最为广泛，占世界上投入运行的FGD系统的85%左右，我国大型燃煤发电机组的脱硫方式以湿法石灰石-石膏法FGD工艺为主已成为必然的趋势。已建、在建和拟建湿法石灰石-石膏FGD系统的电厂工程技术人员、工人和管理人员迫切希望有一本具有普及性、实用性的FGD技术手册。基于这种情况，本书以湿法石灰/石灰石FGD技术为主要对象，在广泛收集国内外有关最新技术资料的基础上，结合作者十多年管理电厂湿法石

灰石 FGD 装置的实际经验撰写而成。

本手册共分三篇，第一篇详细、系统地阐述了湿法石灰/石灰石 FGD 工艺。内容主要包括：FGD 系统重要设计参数、工艺变量以及相互关系和它们对系统性能的影响；FGD 系统主要设备和子系统的作用、特性和主要参数；FGD 腐蚀环境和材料选择；FGD 系统可靠性；化学监测以及有关 FGD 系统施工、调试和性能考核等方面的内容。第二篇介绍了 FGD 主要设备的类型、用途、主要性能参数和布置方式；阐述了在目前工艺水平下主要设备在设计 and 选择时应考虑的问题；介绍了适用的结构材料，并根据现有的经验提出了推荐意见。编写的重点放在电厂工程技术人员不太熟悉的设备上，对较熟悉的设备着重提出了在 FGD 工况下应用时应注意的问题。第三篇在介绍 FGD 工艺选择原则的基础上，阐述了 FGD 工艺的技术经济评估体系、评估指标和评估方法，还详细讨论了 FGD 工程标书的技术经济评估。最后按照 6 种典型的湿法 FGD 工艺，选择了 7 个已投运的实例作了较详细的介绍。选择的实例以国内火电厂的 FGD 装置为主，以供选择 FGD 工艺参考。

编者希望通过本手册向读者较为系统地介绍湿法石灰/石灰石 FGD 技术在燃煤发电厂控制 SO_2 排放中的应用，为读者在选择和建设 FGD 系统的过程中提供一些必需、有益的技术资料，帮助电厂技术人员和管理人员作出各种技术和经济方面的决策，使他们选择和建成的 FGD 系统能更好地适应电厂的实际应用，有利于 FGD 装置的管理和工艺参数的优化，从而获得较好的技术经济效益。

本手册由周至祥担任主编，编写人员为：第一篇周至祥；第二篇第一~八章段建中，第九章段建中、周至祥；第三篇薛建明。原南京电力环境保护研究院马果骏和原华北电力设计院王宝德审阅了本手册，并提出了许多宝贵意见，在此深表感谢。

在手册的编写过程中，得到了许多领导的关心、支持和帮助，上海龙净环保工程公司胡健民、马果骏，华北电力设计院王宝德，华北电力科学研究院李庆和重庆发电厂胡光平同志等烟气脱硫界的专家和同仁以及许多电厂工程技术人员给予了热情的协助和大力支持，对此，表示真诚的谢意。

水平所限，加之时间仓促，书中疏漏与不足之处在所难免，恳请广大同仁批评指正。

作者

2005 年 12 月

前言

第一篇 烟气脱硫工艺

第一章 煤中硫分的形态和测定	1	工艺过程主要参数	26
第一节 煤的特性	1	第一节 脱除 SO₂ 的化学原理	26
一、煤的形成与分类(1) 二、煤的组成(2)		一、SO ₂ 脱除过程发生的主要化学反应(26)	
三、煤成分基准及其换算(4)		二、吸收塔不同区域发生的主要化学反应(29)	
第二节 煤中硫的赋存形态	6	第二节 气体吸收过程的机理	31
一、煤中硫的赋存形态(6) 二、我国煤炭硫分的分布(7)		一、物质扩散的基本方式(31) 二、亨利定律(31) 三、双膜理论(31)	
第三节 煤中硫的测定	8	第三节 烟气脱硫工艺过程主要参数	33
一、煤中全硫(S _T)的测定(8) 二、煤中硫铁矿硫的测定(9) 三、煤中硫酸盐硫的测定(10) 四、煤中有机硫的计算(10)		一、烟气流量(G)(33) 二、液气比(L/G)(34) 三、烟气SO ₂ 浓度(35) 四、浆液pH值和钙硫摩尔比(Ca/S)(36) 五、循环浆液固体物浓度和固体物停留时间(38)	
第四节 煤燃烧产生的污染物	10	第四节 FGD 系统对有害空气污染物(HAPs)的去除作用	39
一、煤中硫的燃烧产物(10) 二、煤燃烧过程NO _x 的形成(11) 三、微量元素的污染(11)		第四章 化学添加剂的作用和应用	41
第二章 湿法 FGD 工艺和流程及其应用和发展概况	13	第一节 镁盐	41
第一节 湿法石灰/石灰石烟气脱硫工艺流程	13	第二节 二元酸(DBA)和己二酸	42
一、工艺过程的描述(13) 二、工艺设计和运行主要变量(15) 三、FGD 系统流程布置(16)		第三节 甲酸和甲酸钠	43
第二节 湿法 FGD 工艺的应用情况	18	第四节 添加剂的损耗	44
一、国外应用情况(18) 二、国内应用情况(19)		第五节 应用有机酸添加剂的优缺点	45
第三节 湿法 FGD 技术的发展过程和发展方向	23	一、应用有机酸添加剂的优点(45) 二、应用有机酸添加剂的缺点(47)	
一、早期 FGD 技术的发展(23) 二、FGD 技术的进步(23) 三、FGD 技术的发展方向(24)		第五章 石灰/石灰石 FGD 工艺过程的物料平衡	49
第三章 石灰/石灰石湿法 FGD 原理和工		第一节 物料平衡概述	49
		第二节 工艺过程的水平衡	51
		第三节 溶解固体物(氯化物)浓度	52
		第四节 工艺过程的废水和固体副产物的处理	54
		第六章 烟气脱硫中的氧化和结垢控制	55
		第一节 抑制氧化	55
		第二节 强制氧化	56
		第三节 自然氧化	56

第四节 强制氧化工艺中的结垢控制	57	一、石灰石粒径对FGD系统性能的影响(97)	
第七章 FGD系统设计基本条件	61	二、石灰石粒径的测量(98)	
第一节 现场条件	61	三、石灰石硬度(99)	
一、FGD系统可利用的场地(62)		第十章 脱硫石膏的质量控制	100
二、本地区可选用的石灰或石灰石吸收剂(64)		第一节 保证石膏质量FGD系统设计应	
三、储存吸收剂场地(64)		考虑的问题	100
四、副产物废弃用地(64)		一、石膏副产品质量保证值的提出(100)	
第二节 燃料特性变化范围对FGD装置		二、循环吸收浆液在反应罐中的停留时间对	
设计的影响	65	石膏质量的影响(102)	
一、脱硫前烟气SO ₂ 排放量的单位和换算		三、强制氧化程度对石膏质量的影响(102)	
(65)		四、水力旋流分离器分离效率对石膏质量的影响(103)	
二、我国通常对脱硫前烟气SO ₂ 排放量的		第二节 提高石膏质量运行管理	
计算方法(66)		可采取的措施	103
三、美国通常确定脱硫前SO ₂ 排放量的		第十一章 FGD主要设备类型和特性以及	
计算方法(67)		设计应考虑的问题	107
四、煤中含氧量对FGD装置设计的影响(67)		第一节 吸收塔	107
第三节 烟气特性变化范围对FGD装置		一、吸收塔类型和特点(107)	
设计的影响	68	二、吸收塔模块的结构材料(123)	
一、FGD装置设计烟气流量的确定(68)		第二节 反应罐	124
二、锅炉排烟温度对FGD装置设计的影响		一、反应罐体积(124)	
(68)		二、循环浆液固体物含量(125)	
三、烟气压力(69)		三、反应罐的布置和浆液的搅拌(126)	
第四节 污染控制规定和标准的要求	69	四、强制氧化装置的类型和布置方式以及性能比较(128)	
第五节 补水质量和可利用性	70	五、注入石灰石浆液的位置(131)	
第六节 对脱硫石膏的质量要求	71	六、反应罐的结构材料(131)	
第八章 FGD设计参数	74	第三节 除雾器	132
第一节 烟气流速	74	一、除雾器的基本工作原理(132)	
一、烟道中的烟气流速(75)		二、折流板除雾器板片的形状和特点(133)	
二、吸收塔/除雾器烟气流速(75)		三、除雾器布置方向及优缺点比较(133)	
第二节 吸收塔液/气比(L/G)	76	四、烟气流速对除雾器性能的影响(135)	
第三节 吸收剂利用率	78	五、除雾器板片特性对除雾器性能的影响(136)	
第四节 浆液Cl ⁻ 浓度	81	六、除雾器的级数和级间距(137)	
第五节 化学添加剂浓度	81	七、除雾器冲洗系统(138)	
第六节 计算机程序在优化FGD参数		八、除雾器系统配置的仪器(142)	
中的应用	84	九、除雾器的结构材料(143)	
一、计算物料平衡(84)		第四节 湿烟囱	144
二、预测工艺性能(85)		一、选择湿烟囱需考虑的因素(145)	
三、制定FGD系统技术规范(85)		二、冷凝物形成的原因和特点(147)	
四、预测现有装置改造后的性能(85)		三、湿烟囱工艺对设备的设计要求(148)	
第九章 吸收剂—石灰/石灰石特性以及对FGD系统性能的影响	86	四、湿烟囱的结构材料(150)	
第一节 吸收剂的成分	86	第五节 烟气加热器	152
一、石灰石(86)		一、加热烟气的理由(152)	
二、石灰(89)		二、可供选择的烟气加热方式(153)	
第二节 吸收剂的反应活性	91	三、加热装置结构材料的选择(161)	
一、石灰石的反应活性(91)		四、烟气加热器的能耗(164)	
二、石灰的反应活性(96)		第六节 吸收剂和添加剂制配设备	165
第三节 吸收剂粒径的影响	97		

一、石灰吸收剂制备设备(165)	二、石灰石吸收剂制备设备(168)	三、化学添加剂配制设备(173)	四、选择结构材料应考虑的问题(174)	
第七节 脱硫固体副产物处理设备				175
一、脱硫副产物处理流程及设备配置(175)				
二、一级脱水(176)	三、二级脱水(180)			
四、脱硫固体副产物第三道处理工序(181)				
五、脱硫废弃副产物最终处置方法(183)				
第八节 排放氯化物和废水处理				186
一、煤中氯含量及其赋存状态(186)	二、排放氯化物的原因(187)			
三、FGD系统废水排放量和废水排放方式(188)	四、除去脱硫废水中溶解固体物的废水处理系统(189)			
第十二章 烟气脱硫工艺过程				
控制和仪器				196
第一节 自动调节基础知识				196
一、自动调节回路的主要设备及作用(196)				
二、过程调节回路的分类(196)				
第二节 烟气脱硫工艺过程主要调节回路				199
一、SO ₂ 脱除效率的控制(199)	二、吸收剂浆液流量控制(203)			
三、烟气流量控制(209)	四、吸收塔反应罐液位和浆液密度控制(212)			
五、除雾器冲洗控制(218)	六、FGD系统总水平衡控制(219)			
第三节 主要测量仪表的选择和使用				219
一、浆液pH值计(219)	二、浆液密度计(221)			
三、罐、池液位计(225)	四、流量计(227)			
第十三章 烟气脱硫防腐设计原则和腐蚀环境				232
第一节 FGD系统防腐工程的重要性以及防腐设计的原则和步骤				232
一、FGD系统防腐工程的重要性(232)	二、防腐设计的两个基本原则(234)			
三、防腐设计步骤(234)				
第二节 腐蚀环境和材料选择				234
一、影响FGD工艺过程腐蚀性的因素(235)				
二、腐蚀环境分区和推荐选用的材料(236)				
第十四章 金属腐蚀基本概念和常用防腐材料的应用				242
第一节 橡胶衬里				242
一、橡胶产品和特性以及在FGD装置中的应	用(243)			
二、橡胶衬里的施工要求(246)				
第二节 增强树脂衬里				246
一、乙烯基酯(VE)树脂的特性(247)	二、玻璃鳞片(GF)(249)			
三、VE树脂玻璃鳞片衬层的性能和结构(249)	四、玻璃鳞片涂料的施工要求(253)			
第三节 橡胶和增强树脂衬里损坏原因和形态				255
一、衬里过早损坏的原因(255)	二、衬里最终损坏的原因(256)			
第四节 纤维增强塑料(FRP)				256
一、FRP组成和主要特性(256)	二、耐蚀FRP的应用(257)			
第五节 金属腐蚀基本概念				260
一、金属腐蚀机理(260)	二、金属腐蚀形态和分类(261)			
第六节 耐腐蚀金属材料				265
一、耐腐蚀金属材料在FGD系统中的应用概述(265)	二、合金的耐腐蚀性能和FGD系统常用耐腐蚀金属材料的选择(266)			
三、合金板结构选择和焊接工艺(274)	四、合金的检验和焊接质量控制(279)			
第七节 耐腐蚀无机材料				280
一、整体喷涂胶泥(280)	二、耐酸砖(280)			
三、耐酸釉面陶瓷砖板(280)	四、搪瓷(282)			
五、碳化硅砖(283)	六、硼硅酸盐玻璃泡沫衬块(283)			
第八节 主要防腐材料及组件的经济比较				286
一、防腐方案相对成本比较(286)	二、喷淋塔和塔内主要组件材料成本比较(288)			
第十五章 FGD系统的可靠性				290
第一节 FGD系统可靠性发展过程				290
第二节 表示FGD系统可靠性的指标				291
第三节 影响FGD系统可靠性的因素和对策				293
一、设计条件对系统可靠性的影响(293)				
二、化学工艺因素对系统可靠性的影响(293)	三、机械设备对系统可靠性的影响(294)			
第十六章 化学监测				299
第一节 化学监测的目的和任务				299
一、化学监测目的(299)	二、化学监测任务(299)			

第二节 化学监测项目和石膏浆液	
分析流程	301
一、化学监测项目(301)	
二、石膏浆液化学分析流程(309)	
第三节 化学分析结果的计算	310
一、生石灰成分的计算(310)	
二、石灰石成分的计算(310)	
三、脱硫石膏成分计算(310)	
四、石膏浆液组成成分的计算(312)	
五、石灰石中活性碳酸镁含量的估算(314)	
六、Ca/S和氧化率的计算(314)	
七、浆液密度、体积含固量和悬浮固体物质量百分浓度之间的换算(317)	
第四节 化学分析结果的判断	318
一、石灰石(318)	
二、吸收塔石膏浆液(318)	
三、副产物石膏(319)	
第十七章 FGD系统施工应考虑的问题	320
第一节 施工进度	320
一、美国 FGD 工程典型施工进度(320)	
二、日本三菱 FGD 工程施工进度实例(323)	
三、国内 FGD 工程施工进度实例(323)	
第二节 现场设备内衬施工应注意的问题	324
第三节 质量保证和质量控制(QA/QC)的检验和试验	324
一、在设备制造厂进行的检验和试验(325)	
二、现场检验和试验(328)	
第十八章 FGD系统调试和性能考核	330
第一节 单机/单体调试和试运	330
一、进行单机/单体调试前应具备的条件(331)	
二、单机/单体调试步骤(331)	
第二节 分系统调试	333
一、分系统调试范围的划分(333)	
二、分系统调试和试运内容(334)	
第三节 整套启动试运行	335
一、冷态整套调试(335)	
二、热态(进烟)整套调试(336)	
三、168h 满负荷试运行(338)	
第四节 性能考核试验	338
一、性能考核试验概述(338)	
二、性能考核试验步骤和数据整理(340)	
三、对性能考核试验中一些问题的讨论(343)	

第二篇 FGD主要设备

第一章 烟道、膨胀节和烟气挡板	345
------------------------	------------

第一节 烟道和膨胀节	346
一、烟道和膨胀节的类型(346)	
二、设计中应考虑的问题(346)	
三、材料选择(352)	
四、建议(356)	
第二节 烟气挡板门	358
一、类型(358)	
二、设计中应考虑的问题(360)	
三、材料选择(363)	
四、建议(364)	
第二章 增压风机	365
第一节 风机类型	365
第二节 设计上应考虑的问题	367
一、工艺上应考虑的问题(367)	
二、机械方面应考虑的问题(368)	
三、其他需要考 虑的问题(369)	
第三节 材料选择和建议	370
一、材料选择(370)	
二、建议(370)	
第三章 泥浆泵	372
第一节 离心浆液泵的类型	372
一、卧式离心泵(372)	
二、立式泵(374)	
第二节 浆液泵设计应考虑的问题	374
一、工艺上应考虑的问题(374)	
二、机械方面应考虑的问题(375)	
三、其他需要考 虑的问题(378)	
第三节 材料选择	379
一、叶轮(379)	
二、泵壳前后护板(380)	
三、泵壳(380)	
四、使用寿命(380)	
第四章 管道和阀门	381
第一节 管道	381
一、类型(381)	
二、设计中应考虑的问题(382)	
三、材料选择(387)	
四、建议和应用经验(390)	
第二节 阀门	391
一、阀门类型(391)	
二、设计中应考虑的问题(394)	
三、材料选择(397)	
四、建议(397)	
第五章 喷嘴	398
第一节 喷嘴型式	398
一、切向喷嘴(398)	
二、轴向喷嘴(399)	
三、螺旋型喷嘴(399)	
第二节 设计中应考虑的问题	399
一、工艺上应考虑的问题(399)	
二、机械方面应考虑的问题(400)	
三、其他需要考 虑的问题(402)	
第三节 材料选择和建议	402
一、合金钢(402)	
二、陶瓷(402)	
三、其	

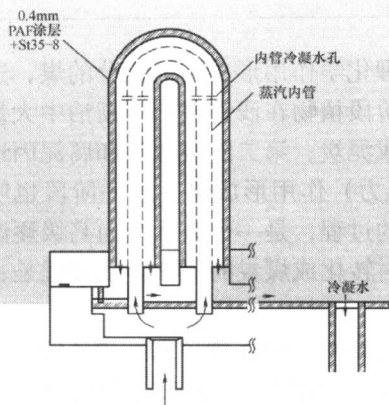
他非金属材料(403)	四、建议(403)	
第六章 脱水设备		404
第一节 浓缩池		404
一、设备类型(404)	二、设计上应考虑的问题(404)	三、材料选择和建议(409)
第二节 旋流器		409
一、设备类型(409)	二、设计上应考虑的问题(411)	三、材料选择和建议(414)
第三节 真空过滤机		414
一、类型(415)	二、设计上应考虑的问题(416)	三、机械方面应考虑的问题(420)
四、材料选择和建议(421)		
第四节 离心脱水机		421
一、类型(421)	二、设计上应考虑的问题(422)	三、材料选择和建议(424)
第五节 真空过滤机和离心脱水机的比较		425
第七章 球磨机		427
第一节 球磨机类型		427
一、卧式球磨机(427)	二、立式球磨机(428)	
第二节 设计上应考虑的问题		429
一、工艺上应考虑的问题(429)	二、机械方面应考虑的问题(432)	三、其他需要考虑的问题(433)
第三节 材料选择和建议		433
一、材料选择(433)	二、建议(434)	
第八章 工艺容器和搅拌器		435
第一节 工艺容器		435
一、工艺容器的类型(435)	二、设计上应考虑的问题(435)	三、材料选择和建议(438)
第二节 搅拌器		438
一、类型(439)	二、设计上应考虑的问题(440)	三、材料选择和建议(445)
第九章 污染物排放连续监测系统 (CEMS)		447
第一节 类型		448
一、抽气式气体分析系统(448)	二、就地烟气分析系统(451)	三、流量监测仪(452)
四、烟尘连续监测仪(455)		
第二节 设计中应考虑的问题		456
一、工艺上应考虑的问题(456)	二、机械方面应考虑的问题(456)	三、其他应考虑

的问题(456)	
第三节 材料选择	459

第三篇 烟气脱硫工艺和工程招标书的技术经济评估

第一章 烟气脱硫工艺选择的原则	461
第一节 影响烟气脱硫工艺选择的主要因素	462
一、排放控制水平与SO ₂ 脱除率(462)	二、外部条件(462)
三、水源条件(465)	四、空间限制条件(465)
五、拟改造电厂剩余寿命的影响(465)	六、费用与效益因素(466)
七、对煤质含硫量及变化的适应性(466)	八、商业运行经验(467)
第二节 影响烟气脱硫工艺选择的综合因素	467
第三节 烟气脱硫工艺选择的主要原则	467
第二章 烟气脱硫工艺的技术经济评估	470
第一节 国内外评估体系	470
一、国外评估体系(470)	二、国内评估体系(471)
第二节 评估指标	473
一、技术评估指标(473)	二、经济评估指标(487)
三、环境评估指标(488)	
第三节 评估方法	489
一、技术评估方法(489)	二、经济评估方法(492)
三、实例分析(494)	
第三章 烟气脱硫工程标书的技术经济评估	502
第一节 技术评估	502
一、检查性能保证项目(503)	二、检查设备和材料的保证项目(504)
三、要求达到的技术要求(504)	四、技术例外条款和选项(506)
五、规定供货范围的确认(507)	六、判定对支持设备的不同要求(507)
七、对设备布置的评估(508)	八、可靠性和可维护性的评估(509)
九、控制与仪表的评估(509)	十、技术评估判据的权重分析(509)
第二节 经济评估	511

一、初始基建费用的确定(511)	二、年度运行和维修费用的确定(513)	三、总成本的经济评估(516)	四、要求的选项和主动提供的选项(516)		
第四章 脱硫装置典型例子分析				518	
第一节 华能珞璜电厂石灰石—石膏湿法烟气脱硫装置				518	
一、概况(518)	二、一期烟气脱硫工艺(520)	三、一期FGD装置的主要技术特点(523)	四、一期脱硫工程验收及运行情况(524)	五、二期脱硫工程(525)	
六、一、二期烟气脱硫工艺特点与差异(528)	七、一、二期脱硫装置的投运与性能考核(530)	八、脱硫工程造价及运行成本(530)			
第二节 太原第一热电厂高速平流简易湿式脱硫装置				532	
一、概述(532)	二、烟气脱硫系统(533)	三、运行试验情况(535)	四、经济分析(536)	五、脱硫石膏品质及利用(537)	
第三节 重庆发电厂湿法烟气脱硫工艺流程分析				538	
一、系统介绍(538)	二、设计参数及指标(540)	三、对运行中出现的一些问题的分析与建议(540)			
第四节 广东国华台山发电厂JBR烟气脱硫装置				543	
一、概况(543)	二、烟气脱硫工艺流程描述(543)				
第五节 德国黑泵电厂双循环湿法FGD装置				546	
一、概述(546)	二、烟气脱硫工艺(547)	三、主要技术特点(551)			
第六节 深圳西部电厂海水脱硫工程				552	
一、概述(552)	二、海水脱硫基本原理(553)	三、海水FGD系统(554)	四、应用前景(557)		
附录一	GB13223—2003 火电厂大气污染物排放标准				559
附录二	DL/T 414—2004 火电厂环境监测技术规范				567
附录三	DL/T 5196—2004 火力发电厂烟气脱硫设计技术规程				590
附录四	DL/T 901—2004 火力发电厂烟卤(烟道)内衬防腐材料				611
附录五	DL/T 943—2005 烟气湿法脱硫用石灰石粉反应速率的测定				629
附录六	DL/T 986—2005 湿法烟气脱硫工艺性能检测技术规范				632
附录七	HJ/T 56—2000 固定污染源排气中二氧化硫的测定 碘量法				650
附录八	HJ/T 57—2000 固定污染源排气中二氧化硫的测定 定电位电解法				654
附录九	HJ/T 75—2001 火电厂烟气排放连续监测技术规范				657
附录十	HJ/T 179—2005 火电厂烟气脱硫工程技术规范 石灰石/石灰—石膏法				677
参考文献				696	



烟气脱硫工艺

本篇共 18 章，较全面系统、详细地介绍了烟气脱硫（FGD）工艺方面的技术。本篇从介绍煤中硫分的形态和测定、FGD 工艺流程、流程布置、应用和发展概况入手，较详细地阐述了 SO_2 吸收的化学过程和主要工艺变量及相互关系，介绍了化学添加剂的作用和应用，FGD 工艺过程的物料平衡和结垢控制。在此基础上，介绍了 FGD 系统设计基本条件以及设计参数，讨论了这些参数的互相关系和对系统性能的影响。然后，对吸收剂特性和脱硫石膏质量控制进行了阐述。在读者对整个 FGD 系统的基本原理、特性和工艺参数有了基本了解后，依次介绍了 FGD 系统主要设备类型和特点以及设计中应考虑的问题，工艺过程主要调节回路和检测仪表，FGD 系统腐蚀环境和常用防腐材料的特性、选择和应用。随后讨论了 FGD 系统的可靠性，就 FGD 系统可靠性的发展过程，表示可靠性的指标和影响系统可靠性的因素和对策作了简要的介绍。化学监测是 FGD 系统日常运行管理中的一项重要工作，本篇辟一章讲述了化学监测的目的、任务和具体测试项目以及化学分析结果的计算和判断。最后介绍了 FGD 系统施工、调试和性能考核有关的内容。本篇各章的内容既相互关联又具有独立性，读者可以按顺序或有选择地进行阅读。

第一章 煤中硫分的形态和测定

煤的组成，特别是煤中硫分的形态和含量对锅炉燃烧后的烟气特性有很大影响，是选择 FGD 类型、FGD 系统设计所必须考虑的因素之一。在 FGD 装置正常运行时，尤其在锅炉燃煤改变煤种或需要进行配煤时，FGD 系统管理人员应及时了解煤中硫分的变化情况，掌握 FGD 系统运行情况的变化，调整运行参数，以获得最佳技术和经济效益。因此，本章简要介绍煤的组成，煤主要成分的和换算方法，煤中硫的形态和测定基本原理。

第一节 煤的特性

一、煤的形成与分类

煤是一种不均匀的有机燃料，是地壳运动的产物。在几亿年前，大量植物的遗体在高压

2 覆盖层以及较高温度条件下, 经过复杂的生物化学和物理化学作用形成不同成分的煤, 这个过程称为成煤作用。成煤作用过程分成两个阶段: 第一阶段植物在浅海或沼泽湖泊中大量繁殖, 经微生物的作用, 低等植物形成腐泥, 高等植物形成泥炭; 第二阶段泥炭和腐泥因地壳运行下沉, 长期受高温(地球温度)、高压(地球岩层压力)作用形成煤, 这一阶段也叫煤化阶段。煤化过程是一个氧和氢含量下降, 碳含量增加的过程, 是一个由低级向高级逐渐变化的过程, 即煤化作用不断加深。因此, 木头和木质材料转化成煤炭的化学转化过程是: 木头→泥炭→褐煤→亚烟煤→烟煤→无烟煤。

煤的成分变化很大, 其典型组分(质量百分数)包括 65%~95%碳, 2%~7%的氢, 高达 25%的氧, 1%~10%的硫, 以及 1%~2%的氮。水分一般在 2%~20%之间变化, 但有的煤水分高达 70%。

我国 1986 年制订的中国煤炭分类方案, 采用煤化程度及工艺性能对煤进行分类, 主要分类参数为干燥无灰基挥发分 V_{daf} , 将煤分成无烟煤(WY)、烟煤(YM)和褐煤(HM)三种。烟煤又分为贫煤(PM)、贫瘦煤(PS)、瘦煤(SM)、焦煤(JM)、肥煤(FM)、1/3焦煤(1/3JM)、气肥煤(QF)、气煤(QM)、1/2中黏煤(1/2ZN)、弱黏煤(RN)、不黏煤(BN)和长焰煤(CY)。另外, 我国动力用煤根据 V_{daf} (%)和低位发热量 Q_{net} (MJ/kg) 分类为无烟煤、贫煤、低挥发分烟煤、高挥发分烟煤和褐煤。

上述三种煤的基本性质如下:

(1) 褐煤(HM)。褐煤是由泥煤形成的初始煤化物, 是煤中等级最低的一类, 形成年代最短。呈黑色、褐色、或泥土色。其特点是水分和灰分含量都较高, 孔隙度大, 挥发分高且析出温度较低, 不黏结, 热值低, 灰熔点普通较低, 含有不同数量的腐殖酸, 氧含量高达 15%~30%左右, 化学反应性强, 热稳定性差。主要用作发电燃料。

(2) 烟煤(YM)。烟煤的形成历史较褐煤为长, 呈黑色, 外形有可见条纹, 挥发分含量为 20%~45%, 碳含量为 75%~90%。烟煤的成焦性较强, 且含氧量低, 水分和灰分量一般不高, 适宜工业上的一般应用。

(3) 无烟煤(WY)。无烟煤的特点是固定碳含量最高, 一般高于 93%, 无机物含量低于 10%, 煤化时间最长, 挥发分低, 有明亮的黑色光泽, 机械强度高, 燃点高, 燃烧时无烟, 着火困难, 储存时不发生自燃。

二、煤的组成

煤的组成包括煤的岩石组成、有机组成与无机组成等, 其中后两者可分别通过对煤进行工业分析与元素分析而得到。

1. 燃煤试验项目和煤成分的代表方法

煤的物化试验项目很多, 为表述和应用方便, 燃煤中常用试验项目的符号采用相应的英文名词的第一个字母或缩略表示。如同一种类型的试验项目需进一步划分时, 同样地采用相应的英文词或缩略字标在试验项目代表符号的右下角的方法表示。常用试验项目符号和其下角标符号分别列于表 1-1-1 和表 1-1-2。

表 1-1-1 燃煤试验项目代表符号

试验项目	代表符号	试验项目	代表符号
水分	M	视(相对)密度	ARD
固体碳	FC	哈氏可磨指数	HGI
真(相对)密度	TRD	前苏联热工研究院可磨指数	VTI

试验项目	代表符号	试验项目	代表符号
变形温度	DT	挥发分	V
软化温度	ST	碳	C
流动温度	FT	氢	H
矿物质	MM	氧	O
最高内在水分	MHC	硫	S
灰分	A	氮	N

表 1-1-2 燃煤试验项目下角标的含义代表符号

下角标含义	代表符号	下角标含义	代表符号
全(水分、硫……)	t	低位(发热量)	net
外在(水分)	f	收到基	ar
内在(水分)	inh	空气干燥基	ad
有机(硫)	o	干燥基	d
硫酸盐(硫)	s	干燥无灰基	daf
硫铁矿(硫)	p	恒湿无灰基	maf
弹筒(发热量)	b	干燥无矿物基	dmnf
高位(发热量)	gr		

2. 煤的工业分析

煤的工业分析也叫技术分析和实用分析,通常包括测定煤的水分、灰分、挥发分,并由此计算固定碳含量。近年来,随着动力用煤按发热量计价和环保的需要,把发热量及硫分两项也列入工业分析中并称为广义的工业分析。具体分析方法可参见相关标准。煤的工业分析是一切工业用煤的基础资料,通过工业分析了解煤质的最基本的特性参数,确定其合理加工利用方向。因此,任何用煤部门都离不开工业分析资料。煤的工业分析内容如下:

(1) 水分。煤中水分按结合状态可分为游离水和化合水两大类。游离水以吸附、附着等机械方式与煤结合。游离水按其赋存状态又可分为外在水和内在水分。化合水则是指与煤中矿物质呈化合状态存在的水,是矿物晶格的一部分,所以也叫结晶水。全水分测定方法是将已知质量的煤样,在 105~110℃ 温度下干燥至恒重,用 M_t 表示。化合水在实际测定中是指除去全水分后仍留下来的水分。在 105~110℃ 温度下化合水是不会分解逸出的。

(2) 灰分。煤在一定的温度(815℃ ± 10℃)下,其中所有可燃物完全燃尽,同时,煤中的矿物质在燃烧过程中发生一系列分解、化合等复杂反应后遗留下来的产物,这些残留物称为灰分产率,通常称为灰分,用 A 表示。煤灰分高低通常反映煤的优劣。按灰分可将煤分为: A < 10% 的煤为特低灰煤, A > 10% ~ 15% 属低灰煤, A > 15% ~ 25% 属中灰煤, A > 25% ~ 40% 属富灰煤, A > 40% 属高灰煤。

煤灰中所含元素多达 60 多种,几乎含有元素周期表中所有的微量元素,其中含量较多的有硅、铝、铁、钙、镁、钠、钾、硫、磷、钛等。这些元素在灰中主要是以氧化物的形态存在,只有极少数为硫酸盐形态存在。煤灰中主要成分及含量范围如表 1-1-3 所示。

表 1-1-3

煤的灰分组成

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O, K ₂ O	SO ₃
含量 (%)	20~60	10~35	5~35	1~20	0.3~4	0.5~2.5	1~4	0.1~12

在 FGD 系统设计中, 进入 FGD 系统烟气的含尘量、飞灰的成分以及飞灰中盐酸可溶性 Al、Fe、Ca、Mg 含量是设计需要掌握的数据。

煤中灰分的来源主要有三个方面: 原生矿物质, 是成煤植物中所含的无机元素, 主要为碱金属的盐类, 含量较少; 次生矿物质, 是煤形成过程中溶有各种盐类的水渗入煤层而混入或与煤伴生的矿物质, 含量也较少; 外来矿物质, 是煤炭开采过程中混入的矿物质。煤中矿物质主要包括黏土、方解石(碳酸钙)、黄铁矿(或白铁矿)、硫酸盐和氧化物以及其他一些伴生矿稀散元素等。

(3) 挥发分。煤在 $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 下隔绝空气加热 7min, 所失去的重量减去水分即为煤的挥发分, 通常用无水无灰基为标准, 以 V_{daf} 表示。随着煤化程度增高, 煤的挥发分将出现规律性的降低, 其变化情况大致是褐煤挥发分含量 $> 40\%$, 烟煤 $10\% \sim 40\%$, 无烟煤 $< 10\%$ 。

(4) 固定碳含量。测定煤的挥发分后, 剩余的残余物即为焦渣, 其外形特征通常称为焦渣特征, 根据焦渣特性可以判断煤的黏结结焦性。它对锅炉用煤的选择有积极的参考意义。焦渣的质量减去灰分即为煤的固定碳含量, 实际固定碳并非纯碳, 其中还含有少量的其他成分, 主要为氢、氮、氧和硫。固定碳一般以干燥基 $(\text{FC})_{\text{d}}$ 为准。

3. 煤的元素分析

煤的元素分析主要是测定煤中的碳、氢、氧、氮、硫等的含量, 其中碳、氢、氮、硫等采用直接分析法测定, 而氧则通过差减法得出。

(1) 煤中碳和氢是产生热量的主要来源, 它们含量的多少决定了发热量的高低。其分析方法是將一定质量的煤炭在氧气流中完全燃烧, 碳转化为 CO_2 , 氢转化为 H_2O , 净化后的 CO_2 和 H_2O 由相应的吸收剂吸收。根据吸收剂的增重来计算煤的碳、氢含量通常用 C_{daf} 和 H_{daf} 表示。

(2) 氧也是煤中重要组成, 在煤中呈化合态存在。其含量可从 $1\% \sim 2\%$ 变化到 40% 左右, 随煤化程度的增高而降低。氧本身不燃烧, 但加热时, 易使有机组分分解成挥发性物质, 烟煤及褐煤含氧量较高, 所以能生成较多的挥发物。煤中含氧量增高, 碳、氢含量相对减少, 因而发热量降低, 不利于燃烧。

(3) 氮基本上是煤中的有害组分。煤中氮绝大部分以有机形态存在, 含量很少, 变化范围不大, 从褐煤到无烟煤变化范围为 $3.0\% \sim 0.5\%$, 而且随煤变质程度的增高而降低。煤中氮在锅炉中燃烧时, 大部分呈游离状态随烟气逸出, 故从燃烧的角度来看, 氮是煤中的无用成分。其中约有 $20\% \sim 40\%$ 在燃烧中能变成 NO_x , 造成大气污染。

煤中氮的测定一般采用开氏法, 此法原理基于煤样在催化剂的存在下用浓硫酸消化, 其中氮和硫酸作用生成硫酸氢铵, 加入过量的氢氧化钠溶液, 通以蒸汽加热赶出氨气, 用硼酸溶液吸收, 最后用硫酸标准溶液滴定。根据消耗的硫酸量计算出氮的含量。

(4) 硫是煤中的有害物质, 煤的焦化、气化和燃烧对环境都会带来不利的影晌。有关硫在煤中存在的形态、煤中硫的测定方法、燃烧过程硫氧化物的形成将专辟一节进行讨论。

三、煤成分基准及其换算

由于煤中的水分和灰分易受外界影响而变化, 所以在讲到煤的成分时应说明分析煤时煤

试样所处的状态，即应该说明煤的分析基准。只有这样，煤的成分才具有实际意义。

煤成分常用的分析基准有收到基、空气干燥基、干燥基和干燥无灰基四种。此外，还有恒湿无灰基，见表 1-1-4。

表 1-1-4 各种燃煤基的状态

燃煤基	燃煤状态	燃煤含有组成
收到基 (ar)	收到时的燃煤	表面水分、空干基水分、灰分、挥发分、固定碳
空气干燥基 (ad)	达到与环境湿度平衡时的燃煤	空干基水分、灰分、挥发分、固定碳
干燥基 (d)	在 105℃ 下干燥后的假想燃煤	挥发分、灰分、固定碳
干燥无灰基 (daf)	扣除水分和 815℃ 下燃烧后灰分质量的假想燃煤	挥发分、固定碳
恒湿无灰基 (maf)	从在 30℃、相对湿度为 97% 下达到平衡的煤中扣除在 815℃ 下燃烧后灰分质量的假想燃煤	水分 (饱和)、挥发分、固定碳

每一燃煤都是由煤炭中某些组成所构成的。构成各燃煤的组成既有相同部分，又有相异部分。各燃煤基组成间的相互关系如图 1-1-1 所示。

常用四种基的工业分析和元素分析结果的组成百分含量表达式如下：

(1) 收到基。以收到状态的煤为基准来表示煤中各组成含量的百分比。

$$\text{工业分析 } M_{\text{ar}} + A_{\text{ar}} + V_{\text{ar}} + \text{FC}_{\text{ar}} = 100$$

$$\text{元素分析 } C_{\text{ar}} + H_{\text{ar}} + N_{\text{ar}} + S_{\text{c,ar}} + O_{\text{ar}} + A_{\text{ar}} + M_{\text{ar}} = 100$$

式中 $S_{\text{c,ar}}$ ——煤中可燃硫。

(2) 空气干燥基。以空气干燥状态的煤为基来表示煤中各组成含量的百分比。

$$\text{工业分析 } M_{\text{ad}} + A_{\text{ad}} + V_{\text{ad}} + \text{FC}_{\text{ad}} = 100$$

$$\text{元素分析 } C_{\text{ad}} + H_{\text{ad}} + N_{\text{ad}} + O_{\text{ad}} + S_{\text{c,ad}} + A_{\text{ad}} + M_{\text{ad}} = 100$$

(3) 干燥基。以无水状态的煤为基来表示煤中各组成含量的百分比。

$$\text{工业分析 } A_{\text{d}} + V_{\text{d}} + \text{FC}_{\text{d}} = 100$$

$$\text{元素分析 } C_{\text{d}} + H_{\text{d}} + N_{\text{d}} + S_{\text{c,d}} + O_{\text{d}} + A_{\text{d}} = 100$$

(4) 干燥无灰基。以假想的无水无灰状态的煤为基来表达煤中各组成含量的百分比。

$$\text{工业分析 } V_{\text{daf}} + \text{FC}_{\text{daf}} = 100$$

$$\text{元素分析 } C_{\text{daf}} + H_{\text{daf}} + N_{\text{daf}} + S_{\text{c,daf}} + O_{\text{daf}} = 100$$

燃煤分析结果从一种基换算到另一种基时的计算为

$$Y = KX_0$$

式中 X_0 ——按原基计算的某一组成含量的百分比；

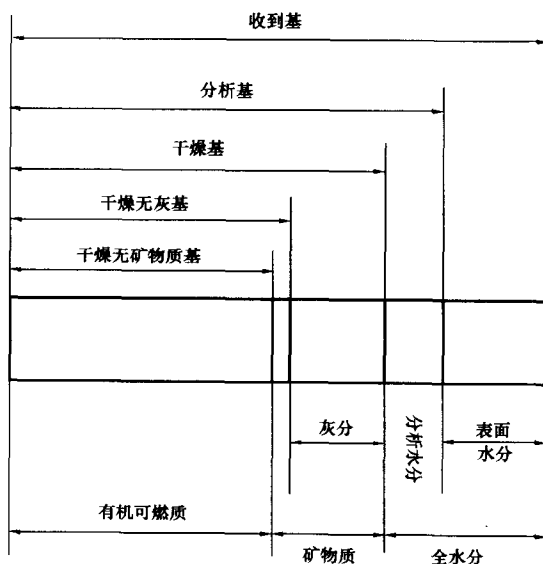


图 1-1-1 燃煤基的组成示意图