

高 职 高 专 规 划 教 材

大气污染控制技术

黄从国 主编

王宗舞 翟 建 副主编



YZLI0890169769



化学工业出版社

高职高专规划教材

大气污染控制技术

黄从国 主编

王宗舞 翟建 副主编



YZLI0890169769



化学工业出版社

·北京·

本书内容共六章。第1章,以一个大气污染源调查案例引入有关大气污染源调查所需的理论知识,主要包括大气污染物的种类、污染物的性能及排放量的测定方法和大气污染防治的措施。第2章,以电厂脱硫案例为引子,重点介绍了燃料的种类、燃烧的设备、燃烧污染物的形成机理及其降低的方法。第3章,主要介绍烟气扩散的影响因素、扩散的高斯模型及其他计算烟囱高度和扩散浓度的方法。第4章,介绍了颗粒污染物的物理特性及各种除尘器的工作原理、设备结构、设计选型和计算。第5章,主要介绍了气态污染物的种类及其净化的方法,以及这些方法在一些常见气态污染物净化中的应用。第6章,介绍了工业通风系统的分类及组成,集气罩、风口、管道系统和风机的设计,系统的防护等。

本书为高职高专环境类专业的教材,也可供工业企业从事大气环境保护的工作人员使用,还可供环境管理干部及技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气污染控制技术/黄从国主编. —北京:化学工业出版社, 2013.2
高职高专规划教材
ISBN 978-7-122-16133-8

I. ①大… II. ①黄… III. ①空气污染控制-高等职业教育-教材 IV. X510.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 304340 号

责任编辑:王文峡

责任校对:徐贞珍

文字编辑:刘莉珺

装帧设计:尹琳琳

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 装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张14 字数342千字 2013年4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:29.00元

版权所有 违者必究

前言

环境科学是一门新兴的边缘学科,学科的产生源于人们对于环境与人的关系的认识深化。从环境问题进行深入思考,人们提出了可持续发展的科学的发展模式。在此思想指导下,我国越来越重视环境的保护,国家环保部的“十二五”发展规划,为接下来的环境保护工作制定了明确的目标。其中,大气污染物的减排和大气污染物的综合防治措施成为主要内容。为完成这些目标,国家大力发展职业教育,培养环境类技术应用型人才成为必然。我国的职业教育起步较晚,仍然处于起步阶段。各个院校都在积极探索职业教育的规律,特别是环境类专业作为新兴专业,开展时间较短,经验较少。

从2010年开始,在全国石油和化工行业教学指导委员会的支持下,组建了由全国十多所高职院校教师组成的新一届环境类教材的编审委员会。经过各个学校的教学文件和教学方法的交流和研讨,逐渐达成了职业教育教学方法和教材编写思路的共识。项目化教学是适合高职教育的教学方法,而环境类专业项目教学的教材却很少。化工出版社高度关注高职教育环境类专业的教学改革,积极支持新一轮的教材编写工作。本教材即是其中一本。

本书的编排思路充分考虑了职业教育的特点,以学生为主体,注重理论知识系统性的同时,强化了专业素质和知识应用能力及专业技能的培养。

本书的理论部分内容完整,保留了大气污染控制技术的理论框架。第1章讲述了大气污染的基础理论,第2章到第5章介绍了大气污染的四大类技术,包括高烟囱排放技术、洁净燃烧技术、除尘技术和气态污染物的控制技术。第6章介绍了以四大类净化技术为核心的工业通风净化系统的分类、组成、设计和维护。原理性的知识讲述以高职学生够用为原则,注重技术的应用,包括工艺流程、设备的设计和运行管理等。

在理论知识讲述之前,以案例引入本章内容,旨在增加学生的兴趣;以任务为驱动,旨在训练学生的知识应用能力和习惯;学生带着任务去进行理论知识的系统学习,并完成任务;通过课后题,复习理论知识的同时,通过拓展任务反复训练,强化知识应用能力。该编写思路和教育部倡导的项目教学法是吻合的。

本书由黄从国任主编,王宗舞、翟建任副主编。其中,第1章、第5章的5.1到5.7节由黄河水利职业技术学院的王宗舞编写,第2章由河北工业职业技术学院的武智佳编写,第3章由常州工程职业技术学院的田丽娟编写,第4章由徐州工业职业技术学院的黄从国编写,第5章的5.1到5.4节由南京化工职业技术学院的翟建编写,第6章由天津渤海职业技术学院的邢竹编写。河北工业职业技术学院刘建秋教授主审。在编写过程中徐州工业职业技术学院季剑波教授提出了建设性的建议,并给予大力支持,化学工业出版社对于本教材的编审工作也给予了大力支持,在此一并表示万分的感谢。

由于编者水平有限,再加上时间仓促,不妥之处在所难免,敬请广大师生、读者、专家批评并给予指正。

编者

2013年1月

目 录

第1章 大气污染基础知识	1	3.1.1 大气圈垂直结构及主要气象要素	38
1.1 大气污染的基本常识	3	3.1.2 气象条件对烟气扩散的影响	42
1.1.1 常用的专业术语	3	3.1.3 下垫面对烟气扩散的影响	47
1.1.2 大气污染的形成过程及主要危害	6	3.2 污染物浓度的估算	49
1.1.3 大气污染控制的法律法规及 主要标准	6	3.2.1 污染物浓度估算公式—— 高斯公式	49
1.1.4 中国大气污染控制战略 目标和措施	7	3.2.2 扩散参数的确定	50
1.2 粉尘性质及其物理性能测定	9	3.2.3 地面最大浓度	55
1.2.1 粉尘粒径分布的测定	9	3.3 烟气抬升现象和烟云抬升高度	56
1.2.2 粉尘真密度的测定	10	3.3.1 烟气抬升现象	56
1.2.3 粉尘比电阻的测定	12	3.3.2 烟云抬升高度的计算	57
1.3 燃烧设备污染物的浓度测定及 排放量计算	14	3.3.3 增加烟气抬升高度的措施	59
1.3.1 烟气中二氧化硫浓度的测定	14	3.4 烟囱高度计算及厂址选择	59
1.3.2 烟气中粉尘浓度的测定	16	3.4.1 烟囱高度计算	59
1.3.3 污染物排放量的计算	19	3.4.2 烟囱设计中的几个问题	61
1.4 大气污染综合防治措施分析	21	3.4.3 厂址的选择	62
1.4.1 大气污染控制综合防治原则	21	【课后思考题及拓展任务】	64
1.4.2 大气污染控制综合防治措施	22	第4章 颗粒污染物控制技术	66
【课后思考题及拓展任务】	23	4.1 除尘器的选择	69
第2章 洁净燃烧技术	24	4.1.1 除尘器的选择原则	69
2.1 燃料的燃烧过程及燃烧设备	25	4.1.2 各类除尘器的适用范围	70
2.1.1 燃料的种类	25	4.1.3 主要粉尘污染行业除尘器的选择	71
2.1.2 燃料的燃烧过程及污染物排 放量的计算	27	4.2 机械除尘器	73
2.1.3 燃烧设备	29	4.2.1 重力沉降室	73
2.2 燃烧过程中主要污染物的形成机制	31	4.2.2 惯性除尘器	75
2.2.1 硫氧化物的形成机制	31	4.2.3 旋风除尘器	76
2.2.2 氮氧化物的形成机制	32	4.3 湿式除尘器	87
2.2.3 颗粒污染物的形成机制	32	4.3.1 概述	87
2.3 煤脱硫技术和低 NO_x 生成燃烧技术	33	4.3.2 湿式除尘器的除尘机理	87
2.3.1 洁净煤技术	33	4.3.3 常见的湿式除尘器	88
2.3.2 低 NO_x 生成燃烧技术	35	4.4 过滤式除尘器	91
2.3.3 水煤浆燃烧技术	35	4.4.1 概述	91
【课后思考题及拓展任务】	36	4.4.2 袋式除尘器	92
第3章 烟气的排放	37	4.4.3 颗粒层除尘器	99
3.1 影响烟气扩散的因素	38	【课后思考题及拓展任务】	101
		4.5 静电除尘器	101
		4.5.1 电除尘器的除尘机理	101
		4.5.2 电除尘器的常用术语	103
		4.5.3 电除尘器除尘效率的影响因素	105

4.5.4 电除尘器的类型	106	5.5 含氟废气的净化技术	180
4.5.5 电除尘器的结构组成	109	5.5.1 含氟废气的来源及危害	180
4.5.6 电除尘器性能参数的确定	112	5.5.2 含氟废气的净化技术	180
4.5.7 电除尘器型号的选择	116	【课后思考题及拓展任务】	182
4.5.8 电除尘器的特点	116	5.6 含挥发性有机物废气净化技术	183
4.5.9 电除尘器运行管理	116	5.6.1 含挥发性有机物废气的 来源及危害	183
4.6 除尘器性能及其测定	118	5.6.2 含挥发性有机物废气的净化技术	183
4.6.1 袋式除尘器性能测定	118	5.7 其他废气净化	189
4.6.2 文丘里洗涤器性能测定	123	5.7.1 酸雾的净化技术	189
【课后思考题及拓展任务】	127	5.7.2 含氯废气的净化技术	192
第5章 气态污染物控制技术	129	5.7.3 含汞废气的净化技术	194
5.1 净化气态污染物的方法	131	【课后思考题及拓展任务】	196
5.1.1 吸收法	131	第6章 工业通风技术	197
5.1.2 吸附法	142	6.1 概述	199
5.1.3 催化法	153	6.1.1 局部通风	200
5.1.4 燃烧法	156	6.1.2 全面通风	201
5.1.5 冷凝法	158	6.1.3 气流组织方式	202
5.2 烟气中二氧化硫净化技术	160	6.2 局部排气罩	203
5.2.1 湿法烟气脱硫	160	6.2.1 密闭罩	203
5.2.2 半干法烟气脱硫	163	6.2.2 通风柜	205
5.2.3 干法烟气脱硫	165	6.2.3 外部排气罩	206
5.3 碱液吸收气体中的二氧化硫	168	6.3 通风系统中的风口	206
5.3.1 实训的意义和目的	168	6.3.1 送风口	206
5.3.2 实训原理	168	6.3.2 室内排风口	208
5.3.3 实训装置、流程、仪器 设备和试剂	168	6.4 通风管道和风机	208
5.3.4 实训方法和步骤	170	6.4.1 通风管道	208
5.3.5 分析方法及计算	170	6.4.2 风机	210
5.3.6 记录实训数据及分析结果	170	6.5 净化系统的保护	211
5.3.7 实训结果讨论	171	6.5.1 净化系统的防腐	211
5.4 烟气中 NO_x 的净化技术	174	6.5.2 净化系统的防爆	212
5.4.1 液体吸收法	174	6.5.3 净化系统的防振	212
5.4.2 选择性催化还原法	176	【课后思考题及拓展任务】	213
【课后思考题及拓展任务】	178	参考文献	214

第 1 章 大气污染基础知识

【案例一】 某大气污染源调查与分析报告

20 世纪 80 年代中期，我国北方某省会城市郊区某火电厂有两台 360MW 发电机组，该火电厂是该城市的主要电力来源之一。观察发现：每天大量滚滚浓烟经简单的初步处理就从火电厂烟囱排往空中；在该电厂的周边及下风向地面上分布着一层厚度约 1~10cm 不等的灰色粉尘，空气中也弥漫着大量粉尘致使空气能见度很小；电厂周边及下风向的植物也常常发生大面积落叶甚至枯死现象。上述现象严重影响电厂周边及下风向环境质量，给居民生活带来诸多不便，同时统计数据也显示：生活在该区域居民的以呼吸系统疾病为代表的多种疾病患病率也明显高于该城市其他地方。

根据该城市环境监测部门的监测结果：该电厂的周边及下风向空气中主要污染物有颗粒物、SO₂、NO_x、CO₂ 等，且浓度远大于当时的《环境空气质量标准》(GB 3095—1982) 中规定的相应污染物浓度限值。根据对该地区主要大气污染物的分类统计分析，其主要污染源可概括为三大类：①燃料燃烧，②工业生产过程，③交通运输；且以上三方面产生的大气污染物所占的比例依次为 70%、20% 和 10%；在燃料燃烧中，又以煤燃烧为主，占 92% 以上。所以，以煤为燃料的火电厂是该火电厂周边地区主要的大气污染源。

【案例分析】

(1) 火电厂发电原理

火电厂是利用煤、石油、天然气作为燃料生产电能的工厂，它的基本生产过程是：燃料在锅炉中燃烧加热水使其成为蒸汽，将燃料的化学能转变成热能，蒸汽压力推动汽轮机旋转，热能转换成机械能，然后汽轮机带动发电机旋转，将机械能转变成电能。其类型按燃料分，有燃煤发电厂，燃油发电厂，燃气发电厂，余热发电厂，以垃圾及工业废料为燃料的发电厂等。火电厂具有技术成熟、布局灵活、建造工期短及燃料易得等特点，在我国得到广泛应用；我国以煤为主的能源结构决定了我国的火电厂主要是燃煤火电厂。但是燃煤火电厂对环境造成了严重污染，尤其是对大气环境的污染。因此，燃煤火电厂是该地区主要的大气污染源。

(2) 煤的主要组成及其燃烧过程

煤炭是古代植物埋藏在地下经历了复杂的生物化学和物理化学变化逐渐形成的固体可燃性矿物。中国是世界煤炭第一生产大国，约 1/3 以上的煤用来发电，目前平均发电耗煤为标准煤 370g/(kW·h) 左右。

在国家标准 [《中国煤炭分类》(GB/T 5751—2009)] 中，煤的工业分析是指包括煤的水分、灰分、挥发分和固定碳四个分析项目指标的测定的总称。煤的工业分析是了解煤质特性的主要指标，也是评价煤质的基本依据。广义上讲，煤的工业分析还包括煤的全硫分和发热量的测定，又称煤的全工业分析。根据分析结果，可以大致了解煤中有机质的含量及发热量的高低，从而初步判断煤的种类、加工利用效果及工业用途。其中，灰分是由煤中所含的碳酸盐、黏土矿以及微量的稀土元素所组成，我国煤炭的平均灰分含量为 25%。煤中的灰分不能燃烧，妨碍可燃物质与氧接触，增加燃烧着火和燃尽的困难，使燃烧不稳定，增加燃烧热损失，降低煤的热值，增加

了烟尘污染和出渣量,造成大气环境污染。所以,煤的灰分含量是评价动力煤的重要指标之一。

构成煤炭有机质的元素主要有碳、氢、氧、氮和硫等,此外,还有极少量的磷、氟、氯和砷等元素。碳、氢、氧是煤炭有机质的主体,占95%以上,煤化程度越深,碳的含量越高,氢和氧的含量越低。碳和氢是煤炭燃烧过程中产生热量的元素,氧是助燃元素。煤炭燃烧时,氮不产生热量,在高温下转变成氮氧化合物和氨,以游离状态析出。硫、磷、氟、氯和砷等是煤炭中的有害成分,其中以硫最为重要。硫以有机硫和无机硫形态存在。有机硫和黄铁矿硫都能参与燃烧反应,因而总称为可燃硫;硫酸盐硫主要以钙、铁和锰的硫酸盐存在,不参与燃烧反应,称为不可燃硫。煤中的可燃性硫是极为有害的,燃烧后可生成 SO_2 和 SO_3 等有害气体,随烟气排放,污染大气,危害动、植物生长及人类健康,腐蚀金属设备等,中国的酸雨主要是由燃煤引起的。所以,硫分含量是评价煤质的重要指标之一。

煤燃烧是指煤中的可燃性组分在空气中发生急剧氧化的过程。如果燃烧过程中空气充足,碳和可燃氢生成 CO_2 和 H_2O ,则称为完全燃烧;反之,若燃烧生成游离碳、 CO 、 H_2 和 CH_4 ,称为不完全燃烧。

实际燃料燃烧过程中,为使燃料能够完全燃烧,必须提供过量的空气。超出理论空气量的空气称为过剩空气。实际供给的空气量(A)与理论空气量(A_0)的比值称为空气过剩系数。

$$\alpha = \frac{A}{A_0}$$

空气过剩系数 α 的大小决定于燃料的种类、燃烧设备及燃烧条件等; α 的大小直接反映出过剩空气量的多少,一般取1.05~1.25。空气过剩系数过大,表示过剩空气量太多,将使烟气量增大,这不仅使引风机的耗电量增加,而且会降低燃烧室温度,对燃烧不利。若空气过剩系数过小,将造成燃料燃烧不完全,使燃料的消耗量增大。

在选择燃烧条件时,基本原则是:保证燃料完全燃烧的前提下,尽可能减小污染物的产生量。

(3) 主要污染物排放量估算

以案例1为例,该火电厂煤炭用量在4000t/d左右,假设煤炭可燃硫含量为0.9%,灰分含量为25%,且煤炭是完全燃烧的。则每年该火电厂 SO_2 产生量约8.6万吨,烟尘的产生量约17万吨, NO_x 的产生量约0.5万吨, CO_2 烟尘的产生量约264万吨。如果该火电厂没有采取相应的污染治理措施,则这些污染物全部排放到大气中,就会对当地的大气环境造成非常严重的污染。

(4) 污染防治措施分析

针对该地区污染现状,以 SO_2 污染防治为例,可以采取的主要防治措施如下。首先应优化该地区能源结构,根据情况逐步开发新能源,如光伏发电、太阳能发电及核电,逐步减小火力发电在整个电源结构中的比例,从源头上解决这个问题。其次,要做好燃烧前脱硫技术,通过物理或物理化学方法将煤中的含硫矿物和矸石等杂质除去,以提高煤质量,并加工成满足不同需要的商品煤的工艺过程,是降低煤中硫含量的主要手段。再次,采用先进的锅炉技术降低单位发电煤耗量,或者采用切实可行的燃烧中固硫技术,如循环流化床燃烧、煤炭转化等,减少燃烧过程中的 SO_2 产生量。

如果受实际情况制约,采取上述措施不现实或处理效果不好,可以采取末端治理的方法,也就是采用锅炉烟气脱硫技术,在不减少污染物产生量的情况下,采用技术措施以减少 SO_2 排放量。对于火电厂而言,由于锅炉烟气量比较大,一般采用湿法脱硫技术,例如石灰石-石膏湿法脱硫技术,通过碱性吸收液吸收固硫,从而有效降低火电厂排放烟气中的 SO_2 排放量,实现保护大气环境目标。关于具体的脱硫技术及其他污染物的综合防治措施等问题,本书后续内容会有

详细介绍。

【任务一】 大气污染源调查与分析

针对当地大气污染现状，进行大气污染源及污染物的调查与分析，并根据实际情况提出切实可行的防治措施，写一篇关于当地大气污染成因及大气污染防治对策的报告。

1.1 大气污染的基本常识

1.1.1 常用的专业术语

(1) 大气组成

自然状态下的大气由干燥清洁的混合气体、水蒸气和悬浮颗粒组成。去掉水蒸气和悬浮颗粒的大气称为干洁大气。地球大气的总质量约为 $5.3 \times 10^{15} \text{t}$ ，占地球质量的百万分之一，其中 98.2% 集中在 30km 以下的大气层中，约有 50% 聚集在距地球表面 5~6km 以下的对流层中。

干洁空气主要由氮 (N_2)、氧 (O_2) 和氩 (Ar) 组成，共占干洁大气总体积的 99.96%。其他气体所占体积不到 0.04%，包括二氧化碳 (CO_2)、氖 (Ne)、氦 (He)、氪 (Kr)、氢 (H_2)、臭氧 (O_3) 等。干洁大气的组成等见表 1-1。 O_2 和 N_2 是大气中的恒定气体成分。其中 O_2 是人类和动植物维持生命极为重要的气体，在大气中发生化学反应时起着极其重要的作用。 N 是地球上有机体的重要组成元素，在有机物中它主要以蛋白质的形式存在， N_2 也是合成氨等化工生产的基本原料。 CO_2 和 O_3 是干洁大气中的可变气体成分，对大气的温度分布影响较大。 CO_2 是主要的温室气体之一，其浓度变化对全球气候产生重要影响。臭氧是大气的微量成分之一，含量随时间和空间变化很大，能大量吸收太阳辐射中的紫外线，保护地球上有机体的生命活动。

表 1-1 干洁大气的组成 (高度 25km 以下)

成 分	体积分数/%	相对分子质量	成 分	体积分数/%	相对分子质量
氮 (N_2)	78.08	28.016	氦 (He)	0.0005	4.003
氧 (O_2)	20.95	32.000	臭氧 (O_3)	0.00006	48.000
氩 (Ar)	0.93	39.944	氢 (H_2)	0.00005	2.016
二氧化碳 (CO_2)	0.032	44.010	氪 (Kr)	0.000008	83.700
氖 (Ne)	0.0018	20.183	氙 (Xe)	0.000001	131.300

水蒸气是实际大气的重要组成部分，在大气中的平均含量不到 0.5%，而且随空间、时间和气象条件变化而变化。水蒸气是实际大气中唯一能在自然条件下发生相变的成分。通过水蒸气相变，使得地表和大气之间以及大气内部的水蒸气、热和能量得以输送和交换。水蒸气对太阳辐射的吸收能力较小，但对地面长波辐射的吸收能力较强。因此，它与二氧化碳一起，对地球起着保温作用。

沉降速率很小的固体和液体颗粒，称之为悬浮颗粒物或悬浮颗粒，它是低层大气的重要组成部分。对辐射的吸收与散射，云、雾和降水的形成，大气光电现象具有重要作用，对大气污染有重要影响。

(2) 大气污染

按照国际标准化组织 (ISO) 的定义, “大气污染通常是指由于人类活动或自然过程引起某些物质进入大气中, 呈现出足够的浓度, 达到足够的时间, 并因此危害了人体的舒适、健康和福利, 或危害了环境的现象”。

总体上来看, 大气污染是由自然界所发生的自然灾害和人类活动所造成的。其中, 自然界所发生的自然灾害主要包括火山喷发排出的火山灰、 SO_2 , 煤田和油田自然逸出的煤气和天然气, 腐烂的动物尸体放出有害气体等。自然灾害所造成的污染多为暂时的、局部的。平常所说的大气污染问题, 主要是人为因素引起的, 这种污染延续时间长、影响范围广, 对环境影响大, 是大气污染控制的主要目标。

(3) 大气污染物

大气污染物 (ISO) 指由于人类活动或自然过程排入大气的并对人或环境产生有害影响的物质。大气污染物种类很多, 根据其存在状态可将其分为两大类: 颗粒污染物和气态污染物。

① 颗粒污染物 是指大气中除气体之外的物质, 包括各种各样的固体、液体和气溶胶。可分为一次颗粒污染物和二次颗粒污染物。一次颗粒污染物指从排放源排放的颗粒, 如从烟囱排出的烟粒、风刮起的灰尘以及海水溅起的浪花。二次颗粒污染物指从排放源排放的气体, 经过某些大气化学过程所形成的微粒, 如来自火力发电厂、钢铁厂、金属冶炼厂、化工厂、水泥厂及工业和民用锅炉排放出的 H_2S 和 SO_2 气体, 经过大气氧化过程, 最终转化为硫酸盐微粒。

从大气污染控制角度, 常见颗粒污染物有粉尘、总悬浮微粒、降尘、飘尘、飞灰、黑烟、液滴、轻雾及重雾。粉尘指悬浮于气体介质中的微小固体粒子, 受重力作用能发生沉降, 但在某一时间内也能保持悬浮状态, 通常是由于固体物质的破碎、分级、研磨等机械过程或土壤、岩石风化等自然过程形成的, 粒子的形状往往是不规则的, 尺寸 $1\sim 200\ \mu\text{m}$ 。总悬浮微粒指大气中的粒径小于 $100\ \mu\text{m}$ 的固体粒子, 它能较长时间地悬浮于大气中。降尘指大气中的粒径大于 $10\ \mu\text{m}$ 的固体粒子, 靠重力作用能在较短时间内沉降到地面。飘尘指大气中的粒径在 $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$ 的固体粒子, 它能长期地在大气中飘浮, 故又称其为浮游粒子或可吸入颗粒物。飞灰指由燃料燃烧产生的烟气带走的灰分中分散的较细的粒子。灰分系含碳物质燃烧后残留的固体残渣。

黑烟指由燃烧产生的能见气溶胶, 是燃料不完全燃烧产生的炭粒, 粒径约 $0.5\ \mu\text{m}$, 在某些文献中以林格曼系数、黑烟的遮光率、沾污的黑度或捕集的沉降物的质量来定量地表达黑烟。液滴指在静止条件下沉降、在紊流条件下能保持悬浮, 主要粒径范围在 $200\ \mu\text{m}$ 以下的小液体粒子。轻雾或霜指液态分散性和液态凝聚性气溶胶的统称, 粒径范围 $5\sim 100\ \mu\text{m}$, 在气象学中它相当于能见度 $1\sim 2\text{km}$ 。重雾指属于气体中的液滴悬浮体的总称, 在气象学中则指造成能见度小于 1km 的小水滴的悬浮体。在工程中, 雾泛指小液体粒子的悬浮体, 是由液体蒸气的凝结、液体的雾化和化学反应等过程形成的, 如水雾、酸雾、碱雾等。

② 气态污染物 气态污染物包括气体和蒸气。其中, 气体是在常温、常压下以气态形式存在的物质, 常见的气体污染物有 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 NH_3 、 H_2S 等。蒸气是某些固态或液态物质受热后, 引起固体升华或液体挥发而形成的气态物质, 例如汞蒸气、苯蒸气、硫酸蒸气等。

气态污染物包括一次污染物和二次污染物。一次污染物是指从污染源直接排出的原始气

态污染物,例如,从污染源直接排放到环境中的 SO_2 、 NO_2 和 CO 等;二次污染物是指由一次污染物与大气中原有成分,或几种一次污染物之间,经过一系列化学或光化学反应而生成与一次污染物性质不同的新污染物,如硫酸烟雾和光化学烟雾。

硫氧化物 (SO_x) 主要是 SO_2 和 SO_3 , 主要由燃煤和石油产生,它的腐蚀性较强,损害植物叶片,影响生长;刺激呼吸系统,引起肺气肿和支气管炎,致癌作用;形成酸雨,生成二次污染物硫酸气溶胶危害更大。氮氧化物 (NO_x) 主要是 NO 和 NO_2 , 来自矿物燃料燃烧和化工厂及金属冶炼厂排放的废气。 NO 和血红蛋白结合比 CO 亲和力大数百倍; NO_2 则具有腐蚀性和刺激作用,能损害农作物;引起呼吸道疾病;是形成光化学烟雾和酸雨的主要因素。

CO_x 是大气中数量最大的污染物,约占 $1/3$ 。 CO_2 是温室气体, CO 是燃料不完全燃烧的产物,与血红蛋白结合阻碍其向人体内供氧。汽车排放的 CO 量最大。

CH 来源燃料燃烧和机动车排气。由于近代有机合成工业和石油化学工业的迅速发展,使大气中的有机化合物日益增多,其中许多是复杂的高分子有机物。

光化学烟雾是指在阳光照射下大气中的 NO_x 、 CH 和氧化剂之间发生一系列光化学反应而生成的蓝色烟雾,主要成分有 O_3 、过氧乙酰基硝酸酯 (PAN)、酮类及酸类等。对人的器官有明显刺激作用,使植物叶面出现“斑点样”,坏死病变,含 PAN、 O_3 等强氧化剂,使橡胶、塑料老化,涂料、油漆褪色剥落。1936 年在洛杉矶开采出石油后,刺激了当地汽车业的发展。由于汽车气化率低,每天有大量碳氢化合物排入大气中,受太阳光的作用,形成了浅蓝色的光化学烟雾,使这座本来风景优美、气候温和的滨海城市,成为“美国的雾城”。这种烟雾刺激人的眼、喉、鼻,引发眼病、喉头炎和头痛等症状,致使当地死亡率增高;同时,又使远在百里之外的柑橘减产,松树枯萎。上述污染事件称之为洛杉矶光化学烟雾事件。

硫酸烟雾是指大气中的 SO_2 等硫化物,在有水雾、含有重金属的飘尘或氮氧化物存大时,发生一系列化学或光化学反应而生成硫酸盐或硫酸盐气溶胶,硫酸烟雾引起的刺激作用和生理反应等危害,要比 SO_2 气体强烈得多。1952 年 12 月 5~8 日,伦敦天气异常,风速不超过 3km/h ,气温也在下降,形成逆温层,相对湿度达到 82% 。在这种无风、逆温和浓雾的气候条件下,污染物蓄积伦敦上空,使伦敦的空气充满了难闻的煤烟味,大气中尘粒高达 $4.46\text{mg}/\text{m}^3$ (平时的 10 倍), SO_2 高达 $3.8\text{mg}/\text{m}^3$ (平时的 6 倍)。大雾期间,伦敦地区死亡人数激增到 2480 人,而大雾所造成的慢性死亡人数达 8000 人,与历年同期相比,多死亡 3000~4000 人。上述污染事件即为伦敦烟雾事件。

(4) 大气污染源

大气污染源通常指向大气中排放出各种污染物的生活或生产过程、设备、场所等,也称人为污染源。地球上分自然过程排放源和人类活动排放源。在大气污染防治中,主要研究和控制的对象是人为污染源。人类活动排放源主要有:①燃料燃烧;②工业生产过程;③交通运输,又称为流动源;④农业施用化肥、农药。

大气污染源分类方法比较多。按污染源存在形式,可分为固定污染源和移动污染源。按污染物排放方式,可分为高架源(污染物通过垂直高度 $>15\text{m}$ 的排气筒排放)、面源(由多个垂直高度 $<15\text{m}$ 的排气筒集合起来而构成的区域性污染源)和线源。按污染物排放的时间,可分为连续源(污染物由排放源连续排放,如造纸厂排放制浆蒸煮废气的排气筒)、间歇源(排放源间歇排放污染物,如取暖锅炉的烟囱)和瞬时源(排放时间短暂,如工厂的事

故排放)。按污染物产生类型,可分为工业污染源、生活污染源和交通污染源等。根据污染原因和污染物的组成,可分为煤烟型污染(由燃煤工业的烟气排放及家庭炉灶等燃煤设备的烟气排放造成的)、石油型污染(由于燃烧石油向大气中排放有害物质造成的)、混合型污染(由煤炭和石油在燃烧或加工过程中产生的混合物造成的大气污染)及特殊型污染(由于各类工业企业排放的特殊气体引起的大气污染)。

1.1.2 大气污染的形成过程及主要危害

(1) 大气污染形成过程

大气污染的形成有三个基本要素,即污染源、大气状态及污染汇(受体)。大气污染主要过程包括:污染源排放污染物;进入大气环境的污染物与大气相互作用,进行着散布、转化和排除等过程;受体对污染物的接受,根据污染物对接受体的影响来确定大气污染的程度。

(2) 大气污染主要危害

① 对人体健康的危害 大气污染物通过表面直接接触、食入含污染物的食物和水、吸入被污染的空气,而对人体健康造成危害。对人体健康的危害主要表现为:引起呼吸道疾病,在突然的高浓度污染物作用下可造成急性中毒,甚至在短时间内死亡,长期接触不同浓度的污染物,会引起各种气管疾病、肺气肿和肺癌等病症。

② 对植物的危害 对植物危害较大的大气污染物主要有二氧化硫、氟化物、二氧化氮和臭氧等。在高浓度污染物的长期影响下,使植物叶表面产生伤斑或坏死斑,甚至直接使植物叶面枯萎脱落;植物长期处在低浓度污染物中,使植物的叶、茎褪绿,减弱光合作用,影响生长;长期在低浓度污染物影响下,尽管外表面看不出受害症状,但其生长机能受到影响,使植物生长减弱,抵抗病虫害的能力降低,发病率提高。

③ 对动物的影响 对动物的影响主要是通过呼吸,引起牛羊等家畜生病;另外,饲料被污染的空气和水间接污染,从而影响到水和饲料的质量,危害家畜的正常生长。

④ 对器物的影响 大气污染物对金属制品、涂料、皮革制品、纺织品、橡胶制品和建筑物的危害十分严重。一是污染物沾污器物表面,大气中的尘、烟等粒子落在器物上等。二是污染物与器物发生化学作用,使器物腐蚀变质,如硫酸雾、盐酸雾、碱雾等使金属产生严重腐蚀,使纺织品、皮革制品等腐蚀破碎,使金属涂料变质。

⑤ 对能见度的影响 对大气能见度或清晰度有影响的污染物,一般应是气溶胶粒子、能通过大气反应生成气溶胶粒子的气体或有色气体。

⑥ 对气候的影响 大气中的浮尘、烟雾和各种气态污染物增多,大气变得浑浊,能见度低,太阳光直接辐射减少。另外,由于大量的废热放出,大气中的微粒形成水蒸气凝核作用等,会使全球或局部地区大气的温度、湿度、雨量等发生变化,温室气体 CO_2 、CFCs、 CH_4 等使得全球气候变暖。

1.1.3 大气污染控制的法律法规及主要标准

(1) 我国目前大气污染控制的法律法规

环境法体系是指为了保护和改善环境、防治污染和公害而建立的各种法律规范,以及由此形成的有机联系的统一整体。中国的环境保护法经过二十多年的建设与实施,现已基本形成了一套完整的法律体系。

① 《中华人民共和国宪法》(以下简称《宪法》)中有关环境保护的规范第二十六条规

定：“国家保护和改善生活环境和生态环境，防治污染和其他公害。国家鼓励植树造林，保护林木。”《宪法》中明确规定：“环境保护是我国的一项基本国策。”《宪法》中的这些规定是环境立法的依据和指导原则。

② 环境保护法 该法是我国有关环境保护的综合性法规，也是环境保护领域的基本法律，主要是规定了国家的环境政策，环境保护的方针、原则和措施，是制定其他环境保护单行法规的基本依据。

③ 环境保护单行法律 环境保护单行法律是污染防治领域和保护特定资源对象的单项法律。目前已经颁布的环境保护单行法包括《中华人民共和国大气污染防治法》等。这些法律属于防治环境污染、保护自然资源等方面的专门性法规。这些环境保护法律的颁布与修订完善，有力地保障和推动了中国环保事业的发展。

④ 环境保护行政法规 环境保护行政法规是由国务院制定的有关环境保护的法规。如《国务院关于环境保护工作的决定》、国务院《征收排污费暂行办法》（已失效）及《大气污染防治法实施细则》等。

此外，我国环境保护的有关技术标准、地方性环境法规、环境保护部门规章、我国的其他法律（如民法、刑法、经济法）以及我国参加的国际条约或由其他国家签订为我国承认的国际协议中有关环境保护的条款，也属我国环保法体系的组成部分。

（2）我国目前大气污染控制的主要标准

大气环境标准是为贯彻《中华人民共和国环境保护法》等法规制定的，是进行环境影响评价，实施大气环境管理，防治大气污染的科学依据。大气环境标准按用途分为大气环境质量标准、大气污染物排放标准、大气污染控制技术标准及大气污染警报标准等。大气环境标准按其适用范围分为国家标准、地方标准和行业标准。

① 大气环境质量标准 以保障人体健康和一定的生态环境为目标，而对大气环境中各种污染物的允许含量所做的限制规定。最基本的大气环境标准，是进行大气环境科学管理、制定大气污染防治规划和大气污染物排放标准的依据，是环境管理部门的执法依据。

② 大气污染物排放标准 对从污染源出口排入大气的污染物含量的限度，以实现大气环境质量标准目标。是直接控制污染物的排放量和进行净化装置设计的依据，是环境质量要求和国家治理技术水平的综合体现。例如《火电厂大气污染物排放标准》，《汽车大气污染物排放标准》，《恶臭污染物排放标准》等。

③ 技术标准 是从污染物排放标准引申出来。为保证达到大气环境质量标准或污染物排放标准的要求而从某一方面作具体规定，使设计或管理人员容易掌握和执行。如《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》、《水泥工业除尘工程技术规范》等。

④ 警告标准 是大气污染恶化到需要向公众发出警报的污染物浓度标准，或根据大气污染发展趋势需要发出警报强行限制已产生的污染危害和污染物的排放量标准。日本和美国等都有某种大气污染物警报标准，以防止严重的大气污染事件。

1.1.4 中国大气污染控制战略目标和措施

国家环境保护“十二五”规划目标为：到2015年，主要污染物排放总量显著减少；城乡饮用水水源地环境安全得到有效保障，水质大幅提高；重金属污染得到有效控制，持久性有机污染物、危险化学品、危险废物等污染防治成效明显；城镇环境基础设施建设和运行水平得到提升；生态环境恶化趋势得到扭转；核与辐射安全监管能力明显增强，核与辐射安全水平进一步提高；环境监管体系得到健全。

“十二五”期间，国家将推进主要污染物减排。大气污染控制方面，将通过以下措施加大二氧化硫和氮氧化物减排力度。

① 持续推进电力行业污染减排。新建燃煤机组要同步建设脱硫脱硝设施，未安装脱硫设施的现役燃煤机组要加快淘汰或建设脱硫设施，烟气脱硫设施要按照规定取消烟气旁路。加快燃煤机组低氮燃烧技术改造和烟气脱硝设施建设，单机容量 30 万千瓦以上（含）的燃煤机组要全部加装脱硝设施。加强对脱硫脱硝设施运行的监管，对不能稳定达标排放的，要限期进行改造。

② 加快其他行业脱硫脱硝步伐。推进钢铁行业二氧化硫排放总量控制，全面实施烧结机烟气脱硫，新建烧结机应配套建设脱硫脱硝设施。加强水泥、石油石化、煤化工等行业二氧化硫和氮氧化物治理。石油石化、有色、建材等行业的工业窑炉要进行脱硫改造。新型干法水泥窑要进行低氮燃烧技术改造，新建水泥生产线要安装效率不低于 60% 的脱硝设施。因地制宜开展燃煤锅炉烟气治理，新建燃煤锅炉要安装脱硫脱硝设施，现有燃煤锅炉要实施烟气脱硫，东部地区的现有燃煤锅炉还应安装低氮燃烧装置。

③ 开展机动车船氮氧化物控制。实施机动车环境保护标志管理。加速淘汰老旧汽车、机车、船舶，到 2015 年，基本淘汰 2005 年以前注册运营的“黄标车”。提高机动车环境准入要求，加强生产一致性检查，禁止不符合排放标准的车辆生产、销售和注册登记。鼓励使用新能源车。全面实施国家第四阶段机动车排放标准，在有条件的地区实施更严格的排放标准。提升车用燃油品质，鼓励使用新型清洁燃料，在全国范围供应符合国家第四阶段标准的车用燃油。积极发展城市公共交通，探索调控特大型和大型城市机动车保有总量。

“十二五”期间，国家还将实施多种大气污染物的综合控制措施。

① 深化颗粒物污染控制。加强工业烟粉尘控制，推进燃煤电厂、水泥厂除尘设施改造，钢铁行业现役烧结（球团）设备要全部采用高效除尘器，加强工艺过程除尘设施建设。20 蒸吨（含）以上的燃煤锅炉要安装高效除尘器，鼓励其他中小型燃煤工业锅炉使用低灰分煤或清洁能源。加强施工工地、渣土运输及道路等扬尘控制。

② 加强挥发性有机污染物和有毒废气控制。加强石化行业生产、输送和存储过程挥发性有机污染物排放控制。鼓励使用水性、低毒或低挥发性的有机溶剂，推进精细化工行业有机废气污染治理，加强有机废气回收利用。实施加油站、油库和油罐车的油气回收综合治理工程。开展挥发性有机污染物和有毒废气监测，完善重点行业污染物排放标准。严格污染源监管，减少含汞、铅和二噁英等有毒有害废气排放。

③ 推进城市大气污染防治。在大气污染联防联控重点区域，建立区域空气环境质量评价体系，开展多种污染物协同控制，实施区域大气污染物特别排放限值，对火电、钢铁、有色、石化、建材、化工等行业进行重点防控。在京津冀、长三角和珠三角等区域开展臭氧、细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）等污染物监测，开展区域联合执法检查，到 2015 年，上述区域复合型大气污染得到控制，所有城市空气环境质量达到或好于国家二级标准，酸雨、灰霾和光化学烟雾污染明显减少。实施城市清洁空气行动，加强乌鲁木齐等城市大气污染防治。实行城市空气质量分级管理，尚未达到标准的城市要制定并实施达标方案。加强餐饮油烟污染控制和恶臭污染治理。

④ 加强城乡声环境质量管理。加大交通、施工、工业、社会生活等领域噪声污染防治力度。划定或调整声环境功能区，强化城市声环境达标管理，扩大达标功能区面积。做好重点噪声源控制，解决噪声扰民问题。强化噪声监管能力建设。

1.2 粉尘性质及其物理性能测定

1.2.1 粉尘粒径分布的测定

粒径分布是同粒径范围内的颗粒个数（或质量）所占的比例。以颗粒个数表示所占比例时，称为个数分布；以颗粒的质量表示所占比例时，称为质量分布。除尘技术中多用粒径的质量分布。

目前，粉尘粒径分布的测定方法有激光粒度分析法、惯性冲击式尘粒分级仪法、振荡筛法、显微镜法及离心沉降法等。其中激光粒度分析法准确度和精密度比较好，但仪器价格昂贵；惯性冲击式尘粒分级仪法测定工作量大，且结果准确度难以保证；振荡筛法对细粉尘样品的误差较大；显微镜法是通过光学放大和计数方法测定的，测定结果代表性不足，所以这些方法在实际应用中受到不同程度的限制。所以，本书以离心沉降法为例，介绍粉尘粒径分布的测定方法。

(1) 实验原理

沉降法是根据不同粒径的颗粒在液体中的沉降速度不同测量粒度分布的一种方法。它的基本过程是把样品放到某种液体中制成一定浓度的悬浮液，悬浮液中的颗粒在重力或离心力的作用下发生沉降。不同粒径的颗粒的沉降速度是不同的，大颗粒的沉降速度较快，小颗粒的沉降速度较慢。对于细小的颗粒其沉降速度很慢，因此需要增加离心力场以增加其速度（在离心力场中颗粒所受的重力可以忽略不计）。在离心力场中粒子所受离心力与受到的阻力达到平衡时，则有：

$$\frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)\omega^2 x = 6\pi\eta r \frac{dx}{dt}$$

其中， r 为粒子半径； ρ 、 ρ_0 分别为粒子与介质的密度； $\omega^2 x$ 为离心加速度； $\frac{dx}{dt}$ 为粒子的沉降速度； $6\pi\eta r \frac{dx}{dt}$ 为粒子沉降时所受到的阻力。

对上式积分，可得：

$$r = \sqrt{\frac{9}{2}\eta \frac{\ln \frac{x_2}{x_1}}{(\rho - \rho_0)\omega^2(t_2 - t_1)}} \quad (1-1)$$

以理想的单分散体系为例，利用光学方法可测出清晰界面，记录不同时间 t_1 和 t_2 时的界面位置，由式 (1-1) 可算出颗粒大小，并根据颗粒总数算出每种颗粒占总颗粒的百分数。另外根据颗粒密度还可算出每种颗粒占总颗粒的质量百分数。该方法的粒径测定范围在 $0.01 \sim 60\mu\text{m}$ 。

(2) 仪器与试剂

① WQL 微颗粒测定仪（带工作站）；② 电子天平；③ 超声波清洗器；④ 注射器（50mL 和 1mL 各 1 支）；⑤ 粉末状尘样适量；⑥ 丙三醇；⑦ 无水乙醇。

(3) 尘样采集

如果从含尘气体中采样，其具体方法按照 GB/T 9079 相关规定进行。将采集的粉尘样品装入样品瓶或塑料袋，编号，记录粉尘名称、采样日期、采样方法、采样地点和工况。

(4) 实验步骤

① 测试系统准备 系统连接电源，开机调试后，等待测定。

② 样品液制备 测试前,尘样均要制成质量分数为 0.1%~1%的水悬浮液,加入适量的分散剂,进行搅拌,同时用超声波处理 1~10min,以制得分散良好的样品液。

③ 测定条件选择 根据样品的密度、粒度范围和选定的转速,选择不同浓度的丙三醇-水溶液(质量分数为 1%~85%,具体根据样品的密度、粒度范围和选定的转速确定)作为旋转流体,用量一般在 20~40mL。

在样品注入前,事先注入一层缓冲液于旋转流体表面,形成缓冲层。缓冲液的密度和黏度要小于旋转流体,通常用水作为缓冲液。

注:如果测试样品密度大于 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ 时,则要选用质量分数约 40%的乙醇水溶液。

综合考虑样品的密度、粒度及旋转流体的密度和黏度等因素,选择合适的转速。圆盘的转速在 600~10000r/min。

④ 测定前准备 圆盘转动时,用注射器抽取定量的旋转液注入圆盘腔内,约 2min 后,注入缓冲液,并立即按加速或减速,使缓冲液与旋转流体间的界面消失,形成缓冲层。

⑤ 样品测定 用注射器抽取约 1mL 的样品液,在注完样品液的同时立即按测试开始键,使开始测定的时间准确无误。从样品容器中取样时,要不断摇动并从底部抽样,避免漏掉大颗粒样品。

⑥ 后处理 测定结束后,清除圆盘腔内的废液,用蒸馏水清洗干净,再用软布或纸将腔内擦干净。

(5) 测量结果

将测量结果记录在计算机内,然后整理。每个样品重复测定三次,保证所测粒度的结果值重复性误差在 10%以内。否则,重新测定,直到结果符合要求。

(6) 讨论与分析

① 什么是粉尘的粒径分布?测定粉尘粒径分布的方法有哪些?

② 离心沉降法测定粉尘粒径分布的原理是什么?

③ 离心沉降法测定粉尘粒径分布时,有哪些注意事项?

1.2.2 粉尘真密度的测定

(1) 实验原理

粉尘的真密度是单位体积无空隙粉尘的质量,用 g/cm^3 表示。用比重瓶法测定粉尘的真密度,是使装有一定量粉尘的比重瓶内形成一定的真空度,从而除去粒子间及粒子本体吸附的空气,用一种已知真密度的液体填充粒子间的空隙,通过称量,计算出尘样真密度的方法。

(2) 设备

① 80 目标准筛;②电热干燥箱;③比重瓶法测定粉尘密度的装置,如图 1-1 所示;④真空表(准确度等级 2.5);⑤分析天平(感量 0.1mg,准确度等级 3 级)。

(3) 尘样采集

如果从含尘气体中采样,其具体方法按照 GB/T 9079 相关规定进行,如果从已捕集的粉尘中采样,则按照 GB/T 12573 的相关规定进行采样。将采集的粉尘样品装入样品瓶或塑料袋,编号,记录粉尘名称、采样日期、采样方法、采样地点和工况(见表 1-2)。

尘样通过 80 目标准筛除去杂物,再在 105°C 下干燥 4h 后,放置在干燥器内自然冷却,准备测定。对于在 $\leq 105^\circ\text{C}$ 时就会发生化学反应或熔化、升华的粉尘,干燥温度应比发生化学反应或熔化、升华温度至少降低 5°C ,并适当延长干燥时间。

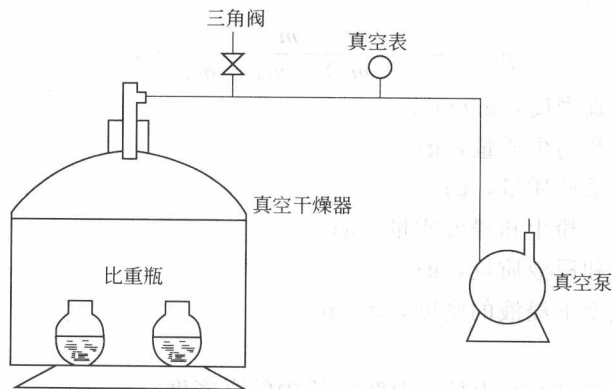


图 1-1 粉尘真密度测定装置

表 1-2 比重瓶法测定粉尘真密度数据记录表

委托单位：_____ 粉尘来源：_____ 粉尘名称：_____ 浸液名称：_____

浸液浓度：_____ 浸液密度：_____ 测定方法：_____ 测定设备：_____

测定日期：_____ 室内温度：_____ 大气压力：_____ 真空装置真空度：_____

比重瓶 编号	比重瓶和 粉尘质量 m_s/g	带盖比重 瓶质量 m_0/g	比重瓶和 浸液质量 m_1/g	比重瓶、粉 尘和浸液质 量 m_{sc}/g	试样真密度/ (g/cm^3) $\rho_P = \frac{m_s - m_0}{(m_s - m_0) + m_1 - m_{sc}} \times \rho_1$	误差 $\frac{\rho_P - \bar{\rho}_P}{\bar{\rho}_P} \times 100\%$

(4) 实验步骤

① 称量洁净干燥的带盖比重瓶质量 m_0 ，然后装入粉尘（约至瓶子容积的 1/4），称量比重瓶和粉尘质量 m_s 。

② 打开比重瓶盖，将浸液注入装有粉尘的比重瓶，湿润并浸没粉尘。

注：浸液要求浸润性好，能与粉尘粒子亲和，但不溶解粉尘，不与粉尘起化学反应，不使粉尘体积膨胀或收缩，且已知密度。例如 0.003mol/L 的六偏磷酸钠 $[(NaPO_3)_6]$ 水溶液。

③ 把装有粉尘和浸液的比重瓶放入真空干燥器。用硬胶管按图 1-1 连接各部件，各连接处应保证严密不漏气。启动真空泵抽气至真空刻度表刻度 $\geq 100kPa$ ，并观察瓶内基本无气泡时停止抽气。

注：抽气开始时，适当调节三通阀，使瓶内粉尘中的空气缓缓排出，以防由于抽气过急，将瓶内粉尘带出。

④ 取出比重瓶，注满浸液并加盖，液面应与盖顶平齐。称取比重瓶、粉尘和浸液质量 m_{sc} 。

⑤ 洗净比重瓶，注满浸液并加盖，液面应与盖顶平齐。称取比重瓶和浸液质量 m_1 。

⑥ 记录室内温度作为测定温度。

注：应取两份平行样品测定值的平均值作为测定结果。2 个平行样测定值相对误差应 ≤ 0.02 。