



环境科学丛书

大气污染控制理论

[美] M. 克劳福特 著

科学出版社

大气污染控制理论

(美) M. 克劳福特 著

卫 政 赵殿五 译

王传珏 王永胜 赵殿五 校

科 学 出 版 社

1987

内 容 简 介

本书从理论上对工业通风、沉降、旋风、静电、洗涤、过滤、吸收、吸附、焚烧及冷凝等大气污染防治技术进行了系统的阐述,对这些技术装置的设计做了详细的理论计算,并列举了大量例题加以说明。本书内容比较丰富,论述深入浅出,理论联系实际,可供从事环境保护工作的工程技术人员参考,尤其适宜作为大专院校环境保护专业师生的参考书。

M. Crawford

AIR POLLUTION CONTROL THEORY

McGraw-Hill, 1976

大气污染控制理论

〔美〕M. 克劳福特 著

卫 政 赵殿五 译

王传钰 王永胜 赵殿五 校

责任编辑 陆晓明

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年12月第二版

开本: 787 × 1092 1/32

1987年12月第一次印刷

印张: 23 7/8 插页: 2

印数: 0001—2,700

字数: 546,000

统一书号: 13031 · 3937

本社书号: 5271 · 13—4

定价: 6.50 元

译 者 的 话

《大气污染控制理论》一书，从理论上对工业通风、沉降、旋风、静电、洗涤、过滤、吸收、吸附、焚烧及冷凝等大气污染防治技术进行了系统的阐述，对这些技术装置的设计做了详细的理论计算，并列举了大量例题加以说明，每章后面还附有大量习题，供读者理解和巩固所学内容时参考。该书内容比较丰富，论述深入浅出，理论联系实际，是一部较好的教学和设计参考书。

党和国家对环境保护工作十分重视，并根据我国宪法的规定，制定了环境保护法。为便于读者借鉴，我们翻译了本书。本书除第六章由赵殿五同志译出外，其余部分，即序、第一至五章、第七至十四章、附录、各章的习题和书末的答案、索引等均由卫政同志译出。译稿的第一至五章由王传珏同志校阅，第七章由赵殿五同志校阅，第八至十四章由王永胜同志校阅。

本书在翻译过程中，曾得到申葆诚先生、赵殿五和余文涛同志的热情鼓励、指导和帮助，路奇云同志为本书编制了主题索引，在此，一并致谢。

由于水平所限，译稿中欠妥甚至错误之处在所难免，敬希读者批评指正。

序 言

大气污染是近几年社会上所关心的最重要的问题之一。就一般群众来说，主要是关心卫生、扩散和管理方面的问题。他们很少想到减少向大气排放污染物的技术问题是很自然的，这是因为没有可借鉴的出版物可使广大群众了解在污染物排入大气之前，就能去除污染物的各种设备的工作情况。

大气污染控制 这一术语可以有两种解释。对于群众来说，多半是指通过法律手段限制或禁止排放污染物。其本质是定出哪些物质应当受到限制，以及把它们限制到什么程度。这些规定要求确定每种污染物对卫生、性能破坏和美学价值的影响。其次，还应当考虑各种不同的污染物之间的相互作用。大气污染控制的这些方面已在过去的几年中进行了广泛的研究。

大气污染控制的第二个含义，亦即本书采用的解释，是从预防的意义上使用控制这个术语的。那么，可用什么方法防止大气污染的发生呢？除了封闭所有的污染源（一般是指给经济带来损失和使生活状态遭受破坏的污染源）之外，还有许多方法适用于或可能适用于去除污染物，使之达到防止造成严重大气污染所必需的限量。这些方法均采用设备的形式，而这些设备是以工程分析为前提，为达到预期的目的来设计、建造、安装和运行的，当然不会没有问题。为了解决这类问题，就需要有经过训练的熟悉这些设备的工程师。本书即试图为这种训练提供帮助。

已经确立的化学工程的分支是气体净化工程。那么，如

何在本书采用的意义上完成不同于气体净化的大气污染控制呢？说实在话，大气污染控制是包括在气体净化范围内的。但是，设计大气污染控制设备时所遇到的问题，与普通气体净化设备遇到的问题相比，往往要困难得多。在从气体中分离溶质的过程中，起初的溶质百分数通常是很大的，而且，一般考虑去除 90—99% 是切实可行的。而在大气污染控制工作中，最初的浓度通常是很低的，同样也要求去除 90—99%。因此，从某种意义上讲，大气污染控制是把普通气体净化放弃的那部分工作继续下去。

首先，希望本书能够成为大气污染控制理论课程的教科书。这门课程可以为高年级的工科学生或攻读学位的工程师开设，以便使他们精通下列内容：(1)定性描述和定性估算与大气污染控制有关的问题；(2)了解各种控制设备的运行方式；(3)评价各种控制设备的性能；(4)评价整个污染控制系统的性能，这种系统可以包括几种控制设备以及有关的管道系统、罩和通风机；(5)深刻理解设备运行的方法并进行改进；(6)设计大气污染控制设备的方法。本书将逐一论述这些课题。

其次，希望本书对大气污染方面的实习工程师有所帮助。本书对他们的潜在作用是能开发智力，而不是弥补设备的不足，就是说，与改进现有设计的缺点相比，本书将提供更多的有助于搞出新设计的知识和使他们得到启发。本书的目的是为从理论上深入了解各种设备的实际设计和分析提供指导。但不是切实解决实际问题的手册或一览表。

本书试图把工程分析的某些领域，特别是流体力学、热力学、热传导、动力学和电动力学，以及化学和物理学的某些方面，应用于大气污染控制设备的初步分析和设计。在这个意义上讲，本书将以同样的方式在内燃机、涡轮机和蒸汽动力厂

的教程中发挥作用，这些教程适用于高年级机械工程专业训练班，并讲述这三个范例。这些书试图在纯理论(例如教授到大学的水平)和现场工程实践之间建立联系。虽然，一般地讲这些书也想使理论和实际相联系，但是，只是到目前为止，它们才把读者带进了实践的领域。据作者所知，本书是第一本试图使大气污染控制的理论和实际相结合的教科书。即使偶然阅读也可以看出，本书是与最新理论、研制材料时的时间限制、大量现场数据(这些数据，仍然被研制大气污染控制设备活跃的各个公司作为专利资料储存着)非常紧密地联系在一起的。作者希望，将来出版的书籍(也许包括本书的最后版本)，能体现出在实践方面应用理论的非常显著的特点。

作者相信，大气污染控制理论与各种可用的控制设备运行理论的加和不是一回事；就是说，理论的综合高于它的各部分理论的加和。这个观点的依据是：第一，对所有的控制设备来说，共同的是都有一个大气污染控制问题，而它又可以由任何单独的设备分别进行处理。第二，存在着可以经常研制新设备和取代这个理论的可能性。第三，在任何大气污染控制系统中都存在着包括各种控制设备和其它元件相互影响的协同效应。第四，存在着涉及选择首先采用的特殊控制设备的知识领域。

存在着或可能存在着能够代替许多专门工程领域的大气污染控制理论的领域，这个领域象在任何其它领域一样，对于一个工业公司来说是困难的、复杂的和重要的。但是，无论如何，根据公司安置工程专业人员的次序和期望的演变，以及分配给它的财力的增加来看，这个领域是得到允许和鼓励的。

包括在本教科书中的材料，对总计六个学期(每学年分为四个学期)课时学分的课程排列来说应该是足够的。如果有所补充的话，它就应当满足维持六个学期(每学期半年)课时

的课程排列。三个学期(每学期半年)课时学分的课程，大约能包括本书的三分之二，也就是说，可包括到第九章或第十章。

作者感谢在本书手稿整个准备期间给予很大支持的伯明翰亚拉巴马大学工程学校。感谢对本书提出许多有益的建议和意见的作者从前的学生们。尤其感谢就一些技术问题与作者进行了大量启发性讨论的 E. R. Greene, Jr. 博士和为我审阅手稿的我的父亲 G. Crawford。

M. 克劳福特

目 录

第一章 绪 论	1
1-1 大气污染控制在现代社会中所起的作用	1
1-2 大气污染控制理论的范围	6
1-3 大气污染物的性质	8
1-4 大气污染的测量	16
1-5 单位	23
1-6 大气污染控制的文献	41
1-7 污染控制设备的设计	43
参考文献	48
习题	50
第二章 流体流动的原理	53
2-1 基本定义	53
2-2 流体的性质	60
2-3 管道中的流体流	73
2-4 边界层理论	83
2-5 物体周围的流体流	90
2-6 流体流中的能量转换	94
2-7 流体流的测量	102
参考文献	112
习题	113
第三章 颗粒在流体中的动力学	119
3-1 起始静止的球形颗粒在外力作用下的运动	119
3-2 Cunningham 校正因子	130
3-3 射入流体中的球形颗粒	134

3-4 球形颗粒在没有外力作用的加速流体流中的运动	142
参考文献	147
习题	147
第四章 污染物的分布和捕集效率	150
4-1 颗粒的性质和捕集	150
4-2 污染物的浓度	157
4-3 颗粒分布	161
4-4 捕集效率	174
4-5 多级捕集器	181
4-6 受控供气范围内的污染物浓度	193
参考文献	196
习题	197
第五章 工业通风系统的设计	207
5-1 导言	207
5-2 稀释通风法	208
5-3 通风罩的技术要求	213
5-4 简单几何形状的通风罩	216
5-5 经验速度等值线	223
5-6 复杂通风罩的设计	225
5-7 导管的设计	231
5-8 通风机的选择和性能	251
参考文献	276
习题	276
第六章 沉降室	289
6-1 沉降室中的层流	291
6-2 沉降室中的湍流	295
6-3 沉降室的经济尺寸	298
6-4 积尘的清除	302
6-5 沉降室的总效率	303
参考文献	310

习题	310
第七章 惯性装置	315
7-1 旋风流	315
7-2 不考虑重力的层流型旋风流的除尘效率	319
7-3 湍流旋风流的除尘效率	322
7-4 离心除尘器	331
7-5 直流旋风浓集器	332
7-6 迴流式旋风除尘器	336
7-7 多管式旋风除尘器	344
7-8 压降及其所需要的功率	345
参考文献	352
习题	352
第八章 静电除尘器	357
8-1 静电除尘器的基本工作原理	357
8-2 带电颗粒的集尘效率	362
8-3 电场	365
8-4 电晕放电的发生	380
8-5 颗粒的充电	386
8-6 单级静电除尘器	399
8-7 两级静电除尘器	417
参考文献	428
习题	429
第九章 颗粒物洗涤器	434
9-1 绪言	434
9-2 球形液滴的拦截作用和惯性碰撞	435
9-3 球形液滴的扩散	451
9-4 捕集的复合模型	457
9-5 一系列液滴的捕集效率	459
9-6 喷雾室	461
9-7 用加速液滴捕集颗粒	470

9-8 旋风洗涤器	486
9-9 文丘里洗涤器	494
参考文献	501
习题	502
第十章 过滤器	508
10-1 圆柱形纤维的拦截和惯性碰撞	509
10-2 向圆柱形纤维的扩散	520
10-3 综合捕集法	525
10-4 过滤床的捕集效率	527
10-5 填充式过滤器的压降	530
10-6 单层过滤器的捕集效率和压降	532
10-7 袋式除尘器和布袋除尘室	536
10-8 布袋除尘室的清洗周期	539
参考文献	549
习题	549
第十一章 吸收装置	554
11-1 由移动的液滴吸收气体	555
11-2 Henry 定律和液滴内的扩散	561
11-3 气体洗涤器	572
11-4 吸收塔	586
参考文献	602
习题	602
第十二章 吸附装置	607
12-1 吸附原理	608
12-2 固定床吸附器	611
12-3 移动床吸附器	630
参考文献	635
习题	635
第十三章 焚烧设备	639
13-1 燃烧化学和燃烧热力学	641

13-2 燃烧室的设计	649
13-3 关于能量守恒的装置	652
13-4 易燃混合物和火炬燃烧	655
13-5 催化复燃室	660
参考文献	663
习题	664
第十四章 冷凝设备	669
14-1 污染物的热力学性质	669
14-2 直接接触的冷凝器	675
14-3 表面热交换器	681
14-4 水蒸气-污染物混合物在表面冷凝器上的冷凝作用.....	688
14-5 空气-污染物混合物在表面冷凝器上的冷凝作用.....	691
14-6 能量守恒的再生系统	692
参考文献	698
习题	699
附 录	702
一、围绕球的蠕动流阻力方程的推导	702
二、误差函数	709
三、符号表	716
四、用国际单位制表示的常用常数	723
五、用国际单位制表示的在标准状态下的空气性质	723
六、用国际单位制表示的在 298K 时的饱和水的性质	724
图表选列	725
习题答案	728
索引(按汉语拼音排列)	743

第一章 绪 论

从本章开始研究降低大气污染水平的科学理论方面的知识，其中最主要的是研究从排放到大气各种流出气流中去除污染物，这一过程可以称为消除污染。这里在任何程度上都不研究用非污染过程代替污染过程的大量合乎需要的方法。当然，在涉及具体过程的详细研究时最好能够讨论这一点。本章就大气污染控制问题作一总的介绍，以后各章分别进行专门研究和数学推导。

1-1 大气污染控制在现代社会中所起的作用

工业化为人类提供了许多物质的和社会性的利益，与此同时，也带来许多废物和社会性的问题，其中之一就是环境污染。大多数生态学家把污染看做对我们生活质量的严重威胁，并公认污染极端出现的可能性。对环境问题的兴趣在最近几年已经变得浓厚起来，因为政府和企业部门受到了很大的要求改变政策和以往已经引起环境恶化事实的压力。法庭的作用和法规已经要求工业企业十分注意污染。看来至少在几年之内有希望使我们的环境清洁到相当的程度。虽然如此，在很大程度上仍需努力去做，而且大量造成污染的习惯作法还继续存在着。对于环境而言，企业存在着阴暗面。研究环境问题的专家已经成功地停掉了许多显然需要的工程项目。这些行动对那些在工程设计中没有考虑环境问题的企业

或者已经考虑了可选设计的多数情况可能是起作用的。尽管如此,仍然需要研究更好的决策方法,以便给出正常企业对环境的影响,而不允许小团体在已经作出决定的情况下阻碍建设。

自从污染伴随着大多数工业活动产生之后,就应当采取控制它的方法。最好的控制方法是从一开始就避免污染,即用不造成污染的工艺过程代替现有的工艺过程。但是,在通常情况下,这是行不通的,因此,必须建立一定的控制方法。一般来说,污染控制方法要增加生产费用,而且,增加的费用多半转嫁到了用户身上。在少数几种幸运的情况下,可在污染控制过程中回收有价值的物料,得到净收入。然而,在大多数情况下,回收的物料都已经实地应用,而且回收物料最经济的收集效率对有效的控制污染来说可能是完全不适当的。

当考虑污染的社会经费——社会上人民群众健康的损害、工厂中工人健康的损害、财物的损失以及美学价值丧失的时候,几乎都表明了污染控制的必要程度。自从公众支付污染或污染控制费用之后,不管怎样,看来公众坚持在必要的地方安装污染控制设备是合理的。而且最好能够做到让污染者承担其污染的全部社会费用。

下面的污染类型是一般公认的。但在不同的类型之间存在着一些交叉部分。

水体污染 在天然水体中(湖泊、溪流、江河和海洋)存在着比正常浓度高的溶解或悬浮的杂质,例如泥沙、化学物品、粪便物、金属元素、有机物或营养物。

空气污染 大气中含有在正常情况下没有的或者大大高于正常浓度的固体颗粒、液滴或气态化合物。

废固体物污染 在陆地或水体中存在着无益数量的有机的或无机的固体物质(包括饲料和食物)。

化学污染 在植物和动物生物组织中存在着具有无益作用的掺杂化学品。

噪声污染 在室外或有限空间中，除了人为的合理的声音之外，存在着一般认为不合需要的杂音，在前一种情况中，直接围绕人的空间是不存在噪声污染的。

热污染 在排放点或排放点下游流入环境的与环境温度不同的气流或水流。

就构成污染而言，尤其是对化学的和噪声的污染情况，存在着不同的见解。例如，某些食品添加剂，食品制造者看作是有益的，而一些消费者看作是掺杂物。再如，一些特殊的声音，一些人认为是美妙的音乐，而另一些人则认为是不和谐的烦人的杂音。

本书所关心的是大气污染，在节 1—3 将要更全面地叙述它。在这点上，我们将研究大气污染控制能够达到的最好结果。应当承认自然过程在不断地净化大气。因此，如果在今天关闭所有人源的污染源的话，则大气最终会被净化到它的天然状态。还必须认识到，自然过程也污染大气，以及天然空气包含着在另一种情况下将被称做污染物的某个水平。由于这样的污染水平是天然的，而且有机体可能会被改造成适应它的形式，因此，我们就把污染空气定义为：含有任意物质的总量大大高于天然空气中的含量的空气。如果这些物质在天然空气中根本没有出现过，则它的出现就构成了污染。当水以各种浓度（从几乎没有开始到饱和为止）出现在大气中的时候，我们不应当把水看做污染物。由于从许多排气管排入大气的排放物可以由几乎纯净的水与空气混合而组成，并可能被误认为污染源，因此，这个特性具有重要的实践重要性。

实际上，从排入大气的任意气流中全部去除任何污染物质是可以实现的。但这样完全的污染控制代价太高，以致在

绝大多数情况下都要认真考虑，而且，事实上也是不必要的。但是，有些情况污染控制实际上必须是完全的。核电站就属于这种状况，在那里决不允许放射性物质泄漏的量大到足以引起损伤的程度。另一个例子是生物武器研究实验室，在那里泄漏一点点有害物质都可能引起彻底毁灭。然而，在大多数情况下，除了严重的损害之外，是可以允许一定量的杂质进入大气的。到那时，自然净化过程将使大气保持适当的纯度。由于在接近完全净化时净化气流的费用急剧增加，因此，必须寻求一个适当的平衡。

一般地讲，净化气流的费用随着气体流速的增大而增加，但是，其速度稍微低于气体流速增大的比例。对已知总量的被捕集物质来说，浓缩气流与稀薄气流相比，其费用是很低的。因此，如果可能的话，最好在用另外的空气稀释之前就净化气流。净化连续气流比净化间断气流更经济，尤其是在只是偶然采用的时候。由于这些原因，要求对钢铁厂的排放物控制到 99%，比要求把 30000 个烤肉炉的排放物控制到 60% 还要经济。诚然，这些烤肉炉可以取消，而且，没有它们生活也会继续下去。但是，对多数人来说，为使空气格外清洁所带来的经济损失是否都有意义呢？下面我们选择一个必须完成的例子。无论如何，要求象控制全部大型污染源一样完全控制全部小型污染源大概是不现实的，虽然小型的独立源远远多于大型源，而且它们的排放总量可能达到或超过大型源的排放量。

在这点上和我们有关的最大的问题是：如果采用现有的大气污染控制技术的最大效费比，我们能够使排入大气的总量减少到什么程度。所谓的效费比指的是当污染的社会费用与控制设备的费用平衡时对整个社会有益的控制程度。如上所述，污染控制难得是在任何其它基础上的效费比。为了至