

空气 污染 控制 理论

空气污染控制理论

[英] 马丁·克劳福德 著

梁宁元 孙佩极 邓煦帆 译

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书根据英国伯明翰亚拉巴马大学工学院教授马丁·克劳福德 (Martin Crawford) 著《Air Pollution Control Theory》一书译出。内容包括：导论、流体流动原理、流体中颗粒动力学、污染物分布和捕集效率、工业通风系统的设计、沉降室、惯性装置、静电除尘器、颗粒洗涤器、过滤器、吸收装置、吸附装置、燃烧装置以及冷凝设备等十四章。每章附有实例和习题，书后有附录和习题答案。本书特点是基本理论密切结合工程设计，为工程技术人员、大专院校师生提供了一本好教材，也为工程技术人员研制设备提供了有益的启示。

本书翻译分工如下：

梁宁元（第一、八、十一、十二、十三章、附录，全书总校）；

孙佩极（第二、三、四、五、六、九、十、十四、十五章）；

邓煦帆（第七章）。

空 气 污 染 控 制 理 论

〔英〕马丁·克劳福德 著

梁宁元 孙佩极 邓煦帆 译

冶金工业出版社 出版

（北京灯市口74号）

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 20 $\frac{1}{2}$ 字数 532千字

1985年4月第一版 1985年4月第一次印刷

印数00,001~6,000册

统一书号：15062·4094 定价4.90元

前 言

空气污染已成为近几年来社会上最关心的突出课题。一般公众所关心的主要是健康、污染分布和法规等方面的问题。看来，公众对于减少大气中扩散物的技术方面却很少考虑。这很大程度上是由于没有出版过适当的著作详细阐述污染物扩散到大气之前就被除掉的各种设备的工作原理。

空气污染控制一词可作两种解释。对一般公众而言，可能意味着用法律来强制限制扩散或禁止扩散。这个解释的含义是确定什么物质应受限制，要控制到什么程度，需要确定每一种物质对健康的影响，对财产的损失，对美学的危害。还应当考虑不同污染物质的互相作用。近几年来，空气污染控制范畴的研究大为扩大。

空气污染控制的第二种含义，也就是本书所采用的那种含义，控制一词有防止的意思。有什么办法防止空气污染发生呢？除了关闭那些使经济瘫痪、生活方式紊乱的全部污染源之外，还存在一些现在或将来可用以把所有污染物排放量降低到不致严重污染大气的手段。这些手段必须利用某种装置来实现，这就需进行工程分析、进行设计、建造、安装和运行，以达到预期的结果，但这并不意味着没有问题。为了解决这些问题，需要有熟悉这些装置的训练有素的工程师。本书就是为提供这种训练而编写的。

化学工程中已确立的一个分支是气体净化。那么，本书采用的空气污染控制与气体净化又怎样区别呢？其实，空气污染控制包含在气体净化学科之中。但是，设计控制装置遇到的问题远多于设计一般气体净化装置。在分离气体中溶质的过程中，溶质的最初含量通常很高，除去90~99%，一般认为切实可行。但在空

气污染控制工作中，最初浓度一般很低，同样需要除去90~99%。从某种意义上来说，空气污染控制是在气体净化之后进行。

本书的目的首先是提供一本有关空气污染控制理论课程的教科书。这一课程是供工科高年级学生或取得学位的工程师学习的。希望学员通晓下列领域：

- (1) 定性描述与定量估计与空气污染有关的控制问题；
- (2) 了解各种控制装置的工作原理；
- (3) 评价各种控制装置的性能；
- (4) 评价整体污染控制系统（包括若干控制装置和连接的管道、防护罩与风机）的性能；
- (5) 较好地掌握设备的操作并改进整套操作方法；
- (6) 设计控制污染装置的整套方法。

本书针对上述各领域进行研究。

希望本书能对在空气污染领域工作的工程师有所裨益。对这方面的工程师来说，本书的潜在用途在于更大程度上的创新，而不是修旧，就是说本书赋予读者见识和启发，以得出新的设计而不是修正现有设计的错误。本书目的是引导读者把理论见解用于各种装置的实际设计与分析，决不是为了解决实际问题提供实用答案的手册或一览表。

本书目的在于将工程分析的某些领域如流体力学、热力学、传热学、力学和电动力学以及化学和物理的某些方面，应用到空气污染控制装置的基本分析和设计上。在此意义上，本书的作用类似高等机械工程课程采用的内燃机、涡轮机或蒸汽动力装置教科书。这些教科书的意图把大学讲授的纯理论与现场工程实践联系起来。虽然这类书一般对理论与实践两方面都同样侧重，但是往往仍是把读者引到实践领域中。就作者所知，本书是试图把空气污染控制理论与实践联系起来的第一本教科书。但随意阅读即可发现本书仍偏重理论方面，这是由于处理方法新颖，搜集资料时间有限，以及本领域很多实际数据仍作为专有资料收藏在从事于研制空气污染控制装置的各公司手中。作者希望今后出版

的书籍，也许包括本书的新版本，会在把理论应用于实际方面有所侧重。

作者认为，空气污染控制理论并不是现有各种控制装置工作理论的总合，也就是说，在这种意义上总体大于部分之和。这个观点可以这样认识：第一，空气污染控制问题的某些方面对所有控制装置都是共同的，而对任一特定装置都可以具体对待。第二，会有新的装置不断出现，并充实理论。第三，存在协同效果问题，这里包括各种控制设备和空气污染控制系统中其他部件的相互作用。第四，还有一门优先选用特定控制装置的知识。

这里存在或可能存在于一个空气污染控制理论领域，可列入工程技术专门领域。这一领域和其他领域一样，是不平坦的，是有争论的，对一个工业社会来说又是重要的。这个领域是否被承认，并促使发展，取决于社会对工程技术专业的重视和期望，取决于能提供的资源情况。

本书包括的内容可供一年四学期制的大学期学分课程应用。稍加补充足够讲六个学期。三个学期学分的课程可学完本书三分之二，亦即学到第九章或第十章。

著者对英国伯明翰亚拉巴马大学工学院在编写期间给予大力支持深表谢意。在此也对我以前的学生大力协助注释与评论表示感谢。尤其感谢格林博士 (E.R.Greene Jr.) 对有关技术资料给予启发性的论述，并感谢我父亲盖伊·克劳福德 (Guy Crawford) 对手稿的浏览。

马丁·克劳福德

目 录

前言

第一章 导论	1
第一节 控制空气污染在现代社会中的作用	1
第二节 空气污染控制理论的范围	5
第三节 空气污染物的性质	6
第四节 空气污染测量	13
第五节 单位	19
第六节 空气污染控制文献	33
第七节 污染控制设备的设计	35
参考文献	39
习题	40
第二章 流体流动原理	43
第一节 基本定义	43
第二节 流体性质	49
第三节 导管中的流动	64
第四节 边界层理论	73
第五节 围绕物体的流动	78
第六节 流体流动中的能量传递	82
第七节 流体流动测量	89
参考文献	98
习题	99
第三章 流体中颗粒动力学	104
第一节 最初静止的球形颗粒在外力作用下的运动	104
第二节 康宁汉修正因子	113
第三节 球形颗粒在流体中的抛射	116
第四节 无外力作用的球形颗粒在加速流动流体中的运动	124
参考文献	129

习题	129
第四章 污染物分布和捕集效率	132
第一节 颗粒的性质和颗粒集合体	132
第二节 污染物的浓度	138
第三节 颗粒分布	142
第四节 捕集效率	153
第五节 多级收尘器	160
第六节 可控空气源环境内污染物的浓度	171
参考文献	173
习题	174
第五章 工业通风系统的设计	182
第一节 绪言	182
第二节 稀释法通风	183
第三节 防护罩分类	186
第四节 简单几何形状的防护罩	189
第五节 实验速度分布	195
第六节 复杂防护罩设计	196
第七节 管道设计	202
第八节 风机的选择和性能	218
参考文献	238
习题	238
第六章 沉降室	248
第一节 沉降室中的层流流动	250
第二节 沉降室中的湍流流动	253
第三节 沉降室的经济尺寸	256
第四节 清灰	259
第五节 沉降室的总效率	260
参考文献	267
习题	267
第七章 惯性装置	271
第一节 旋转流动	271
第二节 在忽略重力的层流旋转流动时的捕集效率	274
第三节 在湍流旋转流动时的捕集效率	277

第四节	离心式收尘器	285
第五节	直通式旋风增浓器	286
第六节	返转流旋风收尘器	296
第七节	多管旋风分离器	296
第八节	压强降和所需功率	298
参考文献		303
习题		304
第八章	静电除尘器	308
第一节	操作基本原理	308
第二节	荷电颗粒的除尘效率	312
第三节	电场	315
第四节	电晕的形成	328
第五节	颗粒荷电	333
第六节	单区静电除尘器	344
第七节	双区静电除尘器	359
参考文献		369
习题		369
第九章	颗粒洗涤器	374
第一节	绪言	374
第二节	对球形液滴的截留作用和惯性碰撞	375
第三节	向球形液滴的扩散	388
第四节	各种捕集方式的综合	394
第五节	许多液滴的捕集效率	396
第六节	喷雾室	397
第七节	加速液滴捕集颗粒	405
第八节	旋风洗涤器	419
第九节	文丘里洗涤器	426
参考文献		432
习题		433
第十章	过滤器	438
第一节	在圆柱形纤维上的截留作用和惯性碰撞作用	439
第二节	向圆柱形纤维的扩散	449
第三节	联合捕集方式	453

第四节 过滤介质床层的捕集效率	455
第五节 填充过滤介质的压强降	458
第六节 单层过滤介质的捕集效率和压强降	459
第七节 袋式过滤器和袋室	463
第八节 袋室的净化周期	465
参考文献	473
习题	473
第十一章 吸收装置	478
第一节 运动液滴吸收气体	479
第二节 亨利定律和液滴内部的扩散	483
第三节 气体洗涤器	494
第四节 吸收塔	506
参考文献	520
习题	520
第十二章 吸附装置	525
第一节 吸附原理	525
第二节 固定床吸附器	528
第三节 移动床吸附器	544
参考文献	548
习题	548
第十三章 燃烧装置	551
第一节 燃烧化学和燃烧热力学	552
第二节 燃烧室的设计	559
第三节 能量利用装置	562
第四节 可燃混合物和火炬	564
第五节 催化补燃器	569
参考文献	571
习题	572
第十四章 冷凝设备	576
第一节 污染物的热力学性质	576
第二节 直接接触式冷凝器	581
第三节 表面式换热器	587
第四节 表面式冷凝器上水蒸气-污染物混合物的冷凝	593

第五节 表面式冷凝器上空气-污染物混合物的冷凝·····	596
第六节 保存能量的回热制 ·····	597
参考文献 ·····	602
习题 ·····	602
附录 1 围绕球体作层流流动的阻力方程式的推导 ·····	605
参考文献 ·····	610
附录 2 误差函数 ·····	610
附录 3 符号表 ·····	617
附录 4 在SI制中通用常数 ·····	620
附录 5 在SI制中空气在标准状态下的性质 ·····	620
附录 6 在SI制中饱和水在298K时的性质 ·····	621
精选的表图目录 ·····	622
习题答案 ·····	624

第一章 导 论

从本章开始探讨降低大气污染程度的一些理论问题，主要是探讨排入大气中的各种废气中污染物的排除问题，即所谓的除污过程。污染工艺更换为非污染工艺最理想的方法，本书不作任何介绍，这可以在详细研究有关具体工艺时予以完善解决。本章概述控制大气污染这一课题，以后各章比较具体，还有一些数学推导。

第一节 控制空气污染在现代社会中的作用

工业化给人类带来许多物质利益与社会利益，但也引起很多物质问题与社会问题，其中之一就是环境污染。众多生态学者认为，污染严重地威胁着我们的生活，甚至可能威胁到人类社会的存在。近几年来，环境问题越来越受到重视，迫使政府官员及市政当局改变过去降低环境要求的政策与作法。法庭与法律要求工业界重视污染，至少可望数年后环境将有相当程度的改善。虽然如此，还有许多问题有待解决，许多产生污染的习惯作法仍然存在。对环境的这种关心也有消极的一面。环境保护工作者成功地取消了对社会显然需要的许多建设项目。这种作用，在建设项目的的设计对环境没有给予适当注意或者本应考虑采用另一种方案的情况下大多是必要的。然而，对作出决策的程序需要改进，俾使对环境的影响予以适当注意，而对工程一旦作出决定则不允许被环保小组取消。

污染是随着大多数的工业生产而产生的，所以必须采用控制的方法。最好的控制方法首先是用不产生污染的工艺代替现有的工艺，但这往往是行不通的，因此，必须建立某种控制方法。一般，控制污染的方法使生产费用增加，而增加的费用大多又得由

消费者负担。也有少数有利的情况，就是在控制污染过程中回收有价值物料，从而可获得盈利。虽然这几乎都能回收物料，物料回收效率也最经济，但仍不足以有效地控制污染。

如果考虑一下污染的社会代价，即对公众健康的危害、对工厂工人健康的危害、对社会财富的危害、对美学准则的危害，那么几乎时时需要高度地控制污染。由于公众以种种方式付出了污染代价或控制污染的代价，理应坚决主张哪里需要控制污染就在哪里采取控制污染的措施，最好的办法是要求谁造成污染，就由谁完全承担污染的社会代价。

一般认为有下列几种污染形式，不同的污染形式有些是同时存在的。

水污染 天然水域（湖、溪、河、海）中存在溶解或悬浮物的物质，如淤泥、化学制品、粪便、金属元素、有机物质或营养素超过正常浓度。

空气污染 在大气中存在固体颗粒、液滴或气体化合物发生异常现象或浓度显著高于正常浓度。

废物污染 陆地或水域存在有害的有机物或无机物。

化学污染 植物与动物组织中（包括饲料和食品）存在有害的化学制品。

噪音污染 室外大气中或有限空间内发生令人不快的声音，除非人们对此采取措施予以消除。如果人们采取了消音措施，则噪声污染就不会存在于人们活动的空间内。

热的污染 在排放点或下游排入环境中不同温度的气流或水流。

至于构成污染的问题尚有不同的看法，尤其是化学污染和噪声污染。例如有些食品添加剂，生产者认为是有用的，但消费者则认为是掺杂物。某种特殊声音有人认为是动听的音乐，但有些人就认为是不协调的噪音。

本书重点是论述空气污染，在第一章第三节作了详述。在这方面我们将研讨控制空气污染可能达到的最佳结果。必须认识

到自然过程是不断净化空气的。假如一旦人为的污染停止，那么空气最终就会澄清到自然状态。还应当认识到自然过程也会污染空气，而且天然空气含有某种量的从另一角度认为是污染物的物质。由于这种污染程度是在自然界发生的，似乎生物体是能适应的，因此污染的空气的定义是：空气含有某种物质的数量远大于天然空气中该物质的含量。假如某物质在空气中完全不存在，那么一经存在就构成污染。由于大气中的水能从近乎零直到饱和的各种浓度存在，我们不把水看作是污染物。这种区别有重要的实际意义，因为从许多排气管排放到大气中的废气含有与空气混合的纯水，可能被误认为是污染源。

把排入大气的气流中的污染物完全清除掉是可能的，但这种完全控制污染的费用过分昂贵，在大多数情况下无法认真考虑，事实上也不需要。但是有些地方必须完全彻底控制污染。核电站就是如此，这里的放射性物质逸出量绝对不允许大到足以造成损害。生物武器研究试验室是另外一个例子，即使逸出极微量有害物质，也会造成极大的灾难。然而，在大多数情况下，可以允许一定量不洁物质排入大气，这并不会造成严重危害。自然净化过程会使大气保持适当的洁净。要达到接近完全洁净，则净化气流的费用大为增加，因此必须谋求合理的平衡。

通常，净化气流的费用随气流速度增大而增加，但其增加率略低于气流速度的增长。对于定量的捕集物质，浓气流的净化费用远低于稀气流的费用。因此，如果可能，最好气流被空气稀释之前进行净化。净化连续流比净化断续流经济，尤其是净化偶尔出现的气流更不经济。因此，对钢铁厂烟气作99%控制也比对三万家里弄烤肉店烟气作60%控制合算。当然，里弄烤肉店能令其停业，没有这些店铺也能继续生活。但是为使空气特别洁净而值得让许多人失业吗？诸如这种情况必须审慎处理。即使分散的小污染源远多于大污染源，其总排烟量等于或超过大污染源排烟量，但要求象控制大污染源那样控制小污染源毕竟不够现实。

这方面我们最关心的问题是：以最大的成本效果利用现有空

气污染控制技术，那么大气中总污染物质能降低到何种程度？所谓成本效果是指社会的污染代价与控制装置成本平衡时，对整个社会有收益的控制程度。如前所述，从任何角度来看，污染控制成本效果都不佳。为了至少能定性地说明这个问题，假设污染物总量的三分之一来自大工厂，能达98~99%控制率。另三分之一来自中型工厂，能经济地达到90~95%控制率。其余三分之一来自小厂和个体经营，采取控制措施并取消一些不必要的经营则可达60%平均控制率。这样，大气污染量估计约降低84%。看来这作为当前的目标是可取的，大概除了下列两个难以解决的领域外也是能达到的。第一个疑难领域是蒸汽动力厂（发电、生产与供热都包括在内）的废气；第二个是汽车及其他内燃机的废气。这两种情况下的污染物中都含有硫和氮的氧化物。目前正对控制这些污染物散发的方法进行大量研究，在取得研究成果之前，上述目标是不可能完全实现的。

前景如何？假设在几年之内我们把现在的排放量减少15%，那么是否能长期保持这一水平呢？为了回答这个问题，必须首先考虑工业生产率的增长或至少要考虑造成污染的那部分工业生产率；还必须考虑大气污染控制技术的进展。许多实业家与经济学家常预测工业生产能力和每隔十年到二十年增加一倍。例如，公用事业的行政部门经常表示，可预见到的将来希望电力的需求每隔十年增长一倍。当然，工业生产能力从整体来看不可能进展如此之快，但每隔十五年增加一倍似乎是合理的。但是，我们已进入所谓“超工业世纪”（postindustrial age）。未来生产中大大增加的可能是一些无污染的服务性行业，计算机软件就是一个例子。另外，在未来生产中增加的还有相对无污染的行业，诸如尖端电子设备。除了很贫穷的阶层以外，有理由怀疑一般生活水平的美国公民是否真正需要增加生产。鉴于这些原因，生产率的增长将会很慢。但是，只要资源能维持，按人口计的生产率未必能下降。因此，未来工业生产能力增长的下限将决定于人口的增长。

考虑到这些因素，我们有理由设想未能控制的污染年增长率
为4%，这个数字相当于控制前的污染物量每十八年增长一倍。为
了保持控制后的污染程度等于现在排放量的15%，要求十八年后
平均控制率为92%，三十六年后平均控制率为96%。要想达到这
一要求就需要研制更先进的控制污染设备，或对目前技术能达到
98%到99%控制率的大工厂限制其污染性生产。

第二节 空气污染控制理论的范围

空气污染控制理论的含义何在？与空气污染控制装置的研究
区别如何？可用于排除空气中污染物的装置很多，都是根据各种
不同原理研制成的，而目前所用的大部分装置与几年前研制出的
装置相似。这些装置的设计，是根据多年使用中总结出的经验和
理论上取得的认识逐步发展形成的。最普通的装置包括沉降室、
旋风收尘器、各种惯性收尘器、过滤器、静电收尘器、洗涤器、
吸收器、吸附器、燃烧室和冷凝器。许多空气污染控制理论，的
确有助于研究这些装置的运行和获得最佳设计方案。

空气污染控制理论的现状，如果仅限于详细研究各种控制装
置的运行和设计，则可以认为是处于青年时期，也就是说对这些
装置的研究才不过刚刚过了初始阶段，但还不够成熟。为了对
比，让我们考虑一下飞机用燃气轮机，即喷气机的情形。在这一
领域近四十年来进行十分庞大的研究工作，旨在精确描述流动
道、边界层的形成以及系统各组元的传热速率，完整文献达数千
种。但喷气机的研究无疑尚未完善，尚需继续进行多年研究。现
在再来看一下各种污染控制装置的研究工作量。对一些装置的研
究要比另一些更为广泛，静电除尘器大概最受重视。虽然如此，
有关这种控制装置的研究文献数量远少于有关喷气机的研究文献
数量。因此，对静电除尘器的工作细节尚未很好了解，许多其他
控制大气污染的装置研究得更少。对这方面的了解程度，以上
是一种比较悲观的估计，但不能否认，我们已对这些装置的工作
有了相当多的了解。

本书介绍空气污染控制理论，是围绕各个控制装置的理论进行的，但是比较概括性的。各种控制装置对气流的净效应有很多共同点，也就是控制装置的性能可以用捕集效率来表达，而且每种装置在流体中都引起一定的压强降。因此，进行控制装置效果的研究，无需知道用的是何种控制装置。有些控制装置可与其他部件在一个系统中配合使用。各种控制装置的相互作用，包括同类型的或不同类型的，互相之间或与系统中其他部件间的相互作用都可以详细研究。这种方式的研究能阐明大部分空气污染控制理论。整体系统的研究或不同系统性能与经济的对比，均属于本理论范畴。此外，用系统方法或理论方法来选择特殊型空气污染控制装置，属于综合空气污染控制理论的一部分。本书包括通用设备的操作原理、设计和经济选择，还要展开本节概述的空气污染控制理论的探讨。

第三节 空气污染物的性质

污染空气的定义如第一节所述，为空气加上一种或多种异常组分或浓度超常的组分。这种污染组分或污染物以固体、液体、气体或蒸汽形态存在。固体或液体污染物呈粒状，用显微镜观察，这两种污染物颗粒完全不同于气体污染物。另一方面，气体污染物以单独分子存在经空气扩散。用显微镜观察气体污染物分子，不能将它们与空气分子区别开。

污染空气的物质一般分类如下：

粉尘 空气中形状不规则的矿物颗粒混合物尺寸范围 $1\sim 200\mu\text{m}$ ，由于破碎、切削、研磨或类似的操作形成，或是由于岩石与土壤自然风化形成。棉絮与有机物颗粒也属于粉尘。

烟 空气中极细颗粒混合物尺寸范围 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ ，由于燃烧或其他化学过程形成。这种颗粒如果是由固体组成，^③则可能是形状不规则，如果是冷凝形成的，则可能是球形的。

轻雾(霭) 空气中 $5\sim 100\mu\text{m}$ 直径的液滴混合物。

雾 同上，只是其液滴为水滴。