

普通高等教育“十三五”规划教材

热力环境污染 控制工程

卢平 张琦 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十三五”规划教材

热力环境污染控制工程

卢平 张琦 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书是为能源与环境系统工程专业的主干课“热力环境控制”编写的教材,围绕热能利用过程中产生的大气、水、固体废弃物和噪声等污染问题,在系统介绍各种污染控制理论的基础上,阐述各类污染控制技术。全书共分为十二章,包括绪论、颗粒污染物捕集技术基础、常规除尘设备、细颗粒物的形成与控制技术、气态污染物控制技术基础、硫氧化物控制技术、氮氧化物生成与控制技术、燃煤汞及其他重金属控制技术、二氧化碳捕集技术、废水处理与回用、粉煤灰处理及综合利用和噪声污染及控制。对应用广泛的污染控制技术都给出了应用实例,同时由于燃煤污染控制领域的科学研究方兴未艾,本书也跟踪介绍了该领域最新的研究成果。为方便使用,每章都附有思考题或习题,并配有多媒体课件。

本书除了适合用作高等学校能源与环境系统工程专业的教材之外,也可供能源动力类其他专业学生以及能源、环境、化工等领域的工程技术人员、研究人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热力环境污染控制工程 / 卢平, 张琦编著. — 北京:
中国水利水电出版社, 2018.2
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5170-6340-7

I. ①热… II. ①卢… ②张… III. ①环境污染—污
染控制—高等学校—教材 IV. ①X506

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第040737号

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 热力环境污染控制工程 RELI HUANJING WURAN KONGZHI GONGCHENG
作 者	卢平 张琦 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 32印张 759千字
版 次	2018年2月第1版 2018年2月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	76.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

能源与环境系统工程专业是近几年发展起来的新兴本科专业。热力环境控制是该专业新开设的一门专业学位课。本书以热力环境控制的基本教学要求为基础,结合南京师范大学多年讲授该课程的教学经验和体会,并参考和吸收了国内外相关教材、专著和科研成果,系统介绍了热能利用过程中各种污染产生及排放控制的基本知识和技术,内容涉及烟尘、二氧化硫、氮氧化物、汞及重金属、二氧化碳、废水、固体废弃物及噪声等污染控制的基本原理、常用技术和主要装置与设备,并结合工程应用进行了相关的分析与讨论。

考虑到热力过程中的环境污染种类众多,与之相应的治理方法和控制技术也存在较大差异。在充分兼顾系统性和完整性的基础上,本书涵盖了大气、水、固体废弃物、噪声等环境工程学研究领域,涉及粉尘及细颗粒物捕集、气态污染物脱除、总金属控制、CO₂减排、废水处理、粉煤灰综合利用、噪声治理等众多方面,在阐述各种污染治理原理的基础上,力图以有限的篇幅为读者提供更多的热力环境污染控制领域的新方法和新技术,充分反映国内外热力环境污染控制技术的现状与发展趋势。

本书立足学以致用,强调理论联系实际,在知识学习的同时,使学生初步提高自身提出问题、分析问题和解决问题的能力。本书知识覆盖面宽,使用本书作为教材,可根据教学计划要求,合理选择教学内容并确定学时,建议教学时长为45~60学时。

全书共分十二章,由卢平教授任主编,并负责第二章和第五章的编写,张琦任副教授任副主编,并负责第一章、第三章、第六章的编写。参加本书编写的人员还有:徐贵玲博士(负责编写第四章)、张居兵副教授(负责编写第七章)、王运军副教授(负责编写第八章)、赵传文教授(负责编写第九章)、李蔚玲博士(负责编写第十章)、谢浩副教授(负责编写第十一章)和殷上轶博士(负责编写第十二章)。全书由上海电力学院吴江教授和南京师范大学朴桂林教授担任主审。在编写过程中得到了南京师范大学、东南大学、浙江大学、山东大学、上海电力学院等单位的大力协助,在此表示衷心感谢!

编者在编写过程中参考了大量的教材、科研论文、标准和技术规范等资料,并参考借鉴了部分图表,在此向原作者表示衷心的感谢。

由于编者水平和经验所限，书中缺点和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2017 年 11 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 热能的产生和利用	1
第二节 热力环境污染的来源及核算	7
第三节 热力环境污染治理措施及其排放控制	15
第四节 热力环境污染控制与评价的相关法规	19
复习思考题	23
第二章 颗粒污染物捕集技术基础	24
第一节 气溶胶与粉尘	24
第二节 气体与粉尘的物理性质	27
第三节 颗粒捕集的基础理论	44
第四节 颗粒净化装置的性能	54
复习思考题	58
第三章 常规除尘设备	61
第一节 机械除尘器	61
第二节 电除尘器	76
第三节 过滤式除尘器	92
第四节 湿式除尘器	104
复习思考题	115
第四章 细颗粒物的形成与控制技术	119
第一节 细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 的来源及形成机理	119
第二节 细颗粒物的团聚(凝并)长大	123
第三节 细颗粒物控制技术与设备	137
复习思考题	166
第五章 气态污染物控制技术基础	167
第一节 气体扩散	167
第二节 气体吸收	170

第三节 气体吸附	200
第四节 气体催化净化	224
复习思考题	238
第六章 硫氧化物控制技术	242
第一节 燃料中硫的存在形式及硫氧化物的生成	242
第二节 燃烧前脱硫技术	243
第三节 燃烧中脱硫技术	247
第四节 烟气脱硫技术	259
复习思考题	301
第七章 氮氧化物生成与控制技术	302
第一节 燃烧过程中 NO_x 的生成和破坏机理	302
第二节 低 NO_x 燃烧技术	309
第三节 烟气脱硝技术	318
第四节 烟气同时脱硫脱硝技术	335
复习思考题	347
第八章 燃煤汞及其他重金属控制技术	349
第一节 燃煤汞和其他重金属排放现状	349
第二节 燃料中汞和其他重金属的赋存形态	354
第三节 燃烧过程中汞及其他重金属的形态转化	357
第四节 燃煤汞污染控制技术	362
第五节 燃煤其他痕量重金属控制技术	371
第六节 燃煤多污染物联合控制新技术	375
复习思考题	379
第九章 二氧化碳捕集技术	380
第一节 温室效应与 CO_2 减排现状	380
第二节 CO_2 燃烧前捕集技术	388
第三节 CO_2 燃烧中脱除技术	394
第四节 CO_2 燃烧后脱除技术	400
复习思考题	410
第十章 废水处理与回用	411
第一节 火电厂废水来源及水质处理	411
第二节 水处理的技术方法	417
第三节 循环冷却水处理与再利用	430
第四节 除灰渣系统用水处理与循环利用	436
第五节 脱硫废水安全处置	438
第六节 锅炉化学除盐和化学清洗废水处理	441

第七节 其他废水处理	443
复习思考题	444
第十一章 粉煤灰处理及综合利用	446
第一节 粉煤灰综合利用及其相关标准	446
第二节 粉煤灰的特性	447
第三节 燃煤火电厂除灰渣系统	449
第四节 煤灰综合利用技术	459
复习思考题	467
第十二章 噪声污染及控制	469
第一节 噪声及其评价方法	469
第二节 火电厂噪声环境影响评价	472
第三节 火电厂噪声防治技术	480
复习思考题	494
附录	495
参考文献	499

(2) 按能源获得方式可分为: ①一次能源 (primary energy), 在自然界中天然存在, 可直接利用的能源, 包括煤、石油、天然气、风能、水能和地热能等, 其中煤、石油和天然气也称为化石能源 (fossil fuel); ②二次能源 (secondary energy), 是由一次能源直接或间接加工、转换而得的能源, 包括电力、蒸汽、焦炭、煤气、氢气以及各种石油制品等。

(3) 按能源是否可以再生可分为可再生能源 (renewable energy) 和不可再生能源 (non-renewable energy), 其中可再生能源包括太阳能、水能、风能和生物能源, 不可再生能源包括煤、石油、天然气、核燃料等。

(4) 按能源本身的性质可分为: ①含能体能源, 也称为载体能源, 是指可直接储存的物质, 如煤、石油、天然气、氢等, 它们可以直接储存, 便于运输和消费; ②过程性能源, 是指由可提供能量的物质的运动所产生的能源, 如水能、风能、潮汐能、电力等, 其特点是无法直接储存。

(5) 按能源是否作为燃料可分为燃料能源和非燃料能源。燃料能源包括矿物燃料 (煤、石油、天然气)、生物燃料 (薪柴、沼气、粪肥等) 和化工原料 (氢气、一氧化碳、甲烷以及可燃气体的混合物) 和核燃料 (铀、钍等)。非燃料能源包括太阳能、风能、地热能、海洋能、水能、潮汐能、地热能、氢能等。

(6) 按能源对环境污染情况可分为清洁能源 (clean energy) 和非清洁能源。其中清洁能源包括太阳能、水能和风能等, 非清洁能源包括煤和石油等。

第一章 绪 论

第一节 热能的产生和利用

一、能源与能量

1. 能源及其分类

能源 (energy source) 是指可以直接或经过转换而提供人类所需的光、热和动力等任何一种形式能量的载能体资源。能源形式多样, 可根据其来源、获得方式、是否可再生、利用方式和污染程度等进行分类。

(1) 按地球上能源的来源可分为: ①第一类能源是来自地球外天体的能源, 主要是指直接或间接来源于太阳的能源, 如太阳的辐射能 (宇宙射线及太阳能)、化石燃料 (煤、石油、天然气等) 以及生物质能、流水能、风能、海洋能、雷电等; ②第二类能源是地球自身蕴藏的能量, 主要指地热能资源以及原子能燃料, 还包括地震、火山喷发和温泉等自然呈现出的能量; ③第三类能源是地球和其他天体引力相互作用而形成的, 主要指地球和太阳、月球等天体间有规律运动而形成的潮汐能。

(2) 按能源获得方式可分为: ①一次能源 (primary energy), 在自然界中天然存在, 可直接利用的能源, 包括煤、石油、天然气、风能、水能和地热能等, 其中煤炭、石油和天然气也称为化石能源 (fossil fuel); ②二次能源 (secondary energy), 是由一次能源直接或间接加工、转换而得的能源, 包括电力、蒸汽、焦炭、煤气、氢气以及各种石油制品等。

(3) 按能源是否可以再生可分为可再生能源 (renewable energy) 和不可再生能源 (non-renewable energy), 其中可再生能源包括太阳能、水能、风能和生物质能, 不可再生能源包括煤、石油、天然气、核燃料等。

(4) 按能源本身的性质可分为: ①含能体能源, 也称为载体能源, 是指可提供能量的物质, 如煤、石油、天然气、氢等, 它们可以直接储存, 便于运输和传输; ②过程性能源, 是指由可提供能量的物质的运动所产生的能源, 如水能、风能、潮汐能、电力等, 其特点是无法直接储存。

(5) 按能源是否作为燃料可分为燃料能源和非燃料能源, 其中燃料能源包括矿物燃料 (煤炭、石油、天然气)、生物质燃料 (薪柴、沼气、有机废物等)、化工燃料 (甲醇、酒精、丙烷以及可燃原料铝、镁等) 和核燃料 (铀、钚) 等四大类, 非燃料能源包括水能、风能、地热能、海洋热能、太阳能、激光等。

(6) 按能源对环境的污染情况可分为清洁能源 (clean energy) 和非清洁能源, 其中清洁能源包括太阳能、水能和海洋能, 非清洁能源包括煤和石油。

2. 能量及其形式

能量 (energy) 指产生某种效果 (变化) 的能力。到目前为止, 人类认识的能量包括机械能、热能、电能、辐射能、化学能和核能等 6 种形式。

二、热能的转换与利用

热能 (thermal energy) 是指构成物质的微观分子运动的动能和势能的总和。热能的宏观表现是温度的高低, 它反映了分子运动的激烈程度。热能通常可用式 (1-1) 来表述:

$$E_q = \int T dS \quad (1-1)$$

式中 E_q ——热能, J;

T ——温度, K;

S ——熵, J/K。

热能是能量的一种基本形式, 所有其他形式的能量都可以完全转换为热能, 而且绝大多数的一次能源都是首先经过热能形式而被利用的。因此热能在能量利用中有重要意义。图 1-1 为不同形式的能源与热能的转换与利用的情况。由图可以看出, 其他形式的能量 (如化学能、核能等) 都可以很容易地转换为热能而得到利用, 但其必须遵循相关的能量转换原理。

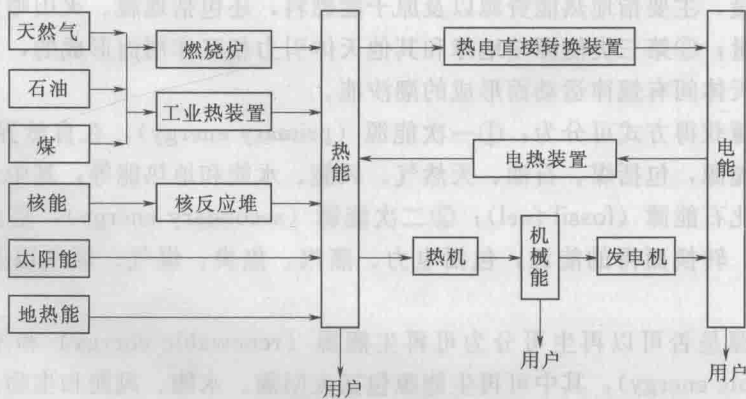


图 1-1 不同形式的能源与热能的转换与利用的情况

1. 热能的产生

热能既可以直接获得, 也可以通过能量转换获得, 前者是将太阳和地热等所提供的热能加以收集后直接使用, 后者则是将蕴藏于燃料中的核能或化学能经适当转换而获得。

化学能转换为热能是人类利用热能最为古老的方式, 也是迄今为止仍为主导的用能方式。化学能通常存储于燃料中, 通过燃料的燃烧来实现化学能转换为热能。燃料按形式可分为固体燃料、液体燃料和气体燃料。天然固体燃料包括煤炭和生物质等。煤炭是世界上储量最多的天然燃料, 尤其在我国的构成中占 70% 左右。天然固体燃料可通过加工变为人工固体燃料, 如焦炭、型煤和木炭等。天然液体燃料即石油。原油通过加工变为人工液体燃料, 如汽油、煤油、柴油和重油等。汽油和柴油通常用于发动机,

重油用于燃煤锅炉点火或低负荷稳燃。天然的气体燃料包括天然气（natural gas）、煤层气、页岩气（shell gas）等，人工气体燃料来源于煤和石油的加工，包括：焦炉煤气、高炉煤气、水煤气和液化石油气等。气体燃料主要用于民用、燃气锅炉、窑炉、燃气轮机以及燃煤锅炉再燃燃料等。

如果说燃料燃烧是通过“烧分子”将化学能转化为热能，那么核能利用则主要是通过“烧原子”将原子核能转化为热能。放射性重金属铀和钚的核裂变（nuclear fission）或核聚变（nuclear fusion）反应可以释放巨大的热能。

2. 热能的利用

热能产生后，一部分作为终端能源直接利用，如民用采暖、工业的工艺用热（包括纺织、印染和化工等过程）；还有相当一部分需要转换为机械能。这部分机械能可再转化为电能，也可作为直接利用的动力。将热能转换为机械能的装置称为热机（heat engine）。应用最广泛的热机包括蒸汽轮机（steam turbine）、燃气轮机（gas turbine）和内燃机（internal combustion engine）等。

蒸汽轮机简称汽轮机，主要用于火力发电厂（thermal power plant）和核电站（nuclear power plant），也可用于大型船舶、风机和水泵等，将水蒸气的热能转换为机械能。目前我国蒸汽轮机发电量占总发电量 80％。燃气轮机可用于发电、飞机和船舶，以高温、高压的燃气作为工作介质，将燃气的热能转换为机械能。内燃机主要用于各种车辆，也可用于可移动的发电机组。

三、我国能源结构及特点

表 1-1 和表 1-2 分别列出了 2005—2014 年我国能源生产和消费总量及其构成。由表可以看出，近 10 年来我国能源生产和消费呈现如下特征：

（1）生产和消费总量稳步上升，其中，能源生产总量由 $216218\times10^4\text{tec}$ （标准煤）上升至 $426095\times10^4\text{tec}$ ，能源消费总量由 $235996\times10^4\text{tec}$ 上升至 $426095\times10^4\text{tec}$ 。

（2）煤炭的生产和消费比重偏高，处于基础性地位。虽然煤炭年产量占比和煤炭年消

表 1-1 2005—2014 年我国能源生产总量及其构成

年份	总量 / $\times10^4\text{tec}$	原油 / $\times10^4\text{t}$	原煤 / $\times10^4\text{t}$	天然气 / $\times10^8\text{m}^3$	电力（水、核、风） / $(\times10^8\text{kW}\cdot\text{h})$
2005	216218	18135	234951	493.20	25002
2006	232166	18476	252855	585.53	28657
2007	247279	18631	269164	692.40	32815
2008	260552	19043	280200	803.00	34668
2009	274618	18949	297300	852.69	37146
2010	296915	20301	323500	948.48	42071
2011	317986	20287	351600	1026.89	47130
2012	331847	20747	364500	1071.53	49875
2013	358784	20991	397432	1208.60	54316
2014	426095	21142	387391	1301.57	56495

表 1-2 2005—2014 年我国能源消费总量及其构成

年份	总量 / $\times 10^4 \text{tec}$	原油 / $\times 10^4 \text{t}$	原煤 / $\times 10^4 \text{t}$	天然气 / $\times 10^8 \text{m}^3$	电力(水、核、风) / $(\times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h})$
2005	235996	32537	231851	467.63	24940
2006	258676	34876	255065	561.41	28587
2007	280507	36658	272745	705.23	32711
2008	291448	37302	281095	812.93	34541
2009	306647	38384	295833	895.20	37032
2010	324939	43245	312236	1069.40	41934
2011	348001	45378	342950	1305.30	47000
2012	361731	47650	352647	1463.00	49762
2013	416913	49970	424425	1705.37	54203
2014	426095	51814	411613	1868.90	56383

费量占比都呈逐年递减趋势,但截至 2014 年,产量占比仍达 70% 以上,消费量占比达 60%。

(3) 能源消费总量都高于能源生产总量。2013 年全年能源生产总量占消费总量的 86%。石油的生产量低、消费量高,供需缺口需依赖进口满足。2013 年,原油生产量占石油消费量 43.9%。

(4) 天然气、水电、核电和风电等清洁能源生产和消费总量逐年上升,并且在总产量和总消费量中的占比也逐年上升;但煤炭的生产和消费总量逐步趋于平稳,并呈现稍有下降的趋势。

2013 年,清洁能源生产总量占能源总产量 14.7%,消费总量占总消费量 14.0%。

2014 年年底,国务院颁布的《能源发展战略行动计划 2014—2020》指出,我国优化能源结构的路径是:降低煤炭消费比重,提高天然气消费比重,大力发展风电、太阳能、地热能等可再生能源,安全发展核电。到 2020 年,要求我国非化石能源占一次能源消费比重达到 15%,天然气比重达到 10% 以上,煤炭消费比重控制在 62% 以内,石油比重为 13%。

四、能源利用中的环境问题

在热力发电厂尤其是燃煤电厂中,各种污染物的排放带来的主要环境问题包括:光化学烟雾、酸沉降、大气颗粒物问题、全球气候问题、水体污染、重金属问题和噪声问题等。

对流层大气的组成见表 1-3,其中停留时间是指某组分在进入大气后到被清除之前在大气中停留的平均时间。对流层大气中除了氮气、氧气和稀有气体等主要成分外,还含有许多微量组分,主要划分为含硫化合物、含氮化合物、含碳化合物和含卤素化合物。这些物质的大气浓度范围都很低,一般在百万分之一到十亿分之一之间甚至更低,但它们的反应活性非常强,对人类和生态环境造成多方面的影响。当这些气体大量排放进入大气中,会造成严重的环境问题。

表 1-3 对流层大气的组成

组 分	气体	相对分子量	平均混合比/(mL/m)	停留时间/年
主要组分	N ₂	28.01	780840	10 ⁶
	O ₂	32.00	209460	10
次要组分	Ar	39.95	934	10 ⁷
	CO ₂	44.01	355	5~10
痕量组分	Ne	201.8	18.0	10 ⁷
	He	4.003	5.20	10 ⁷
	CH ₄	16.04	1.72	10
	Kr	83.80	1.10	10 ⁷
	H ₂	2.016	0.58	6~8
	N ₂ O	72.02	0.31	120
	H ₂ O(g)	18.02	变化值	0~0.027

1. 光化学烟雾和氮氧化物问题

大量的氮氧化物(NO_x)和挥发性有机化合物(VOCs)排放入大气,在强日光、低风速和低湿度等稳定的天气条件下发生一系列复杂的化学反应,生成以臭氧为主,同时还包括醛类、过氧乙酰硝酸酯、过氧化氢和细粒子气溶胶等污染物的强氧化性气团,该现象称为光化学烟雾污染(photochemical smog pollution)。

氮氧化物的排放带来的危害主要有:①对人体有致毒作用,氮氧化物刺激呼吸道和肺部,并造成腐蚀损害,还会引起急慢性中毒;②对植物有损害作用;③NO_x是形成酸雨、酸雾的原因之一;④NO_x与碳氢化合物形成化学烟雾,造成二次污染;⑤N₂O会参与臭氧层的破坏。

2. 酸沉降(acid precipitation)

大气中酸性物质向地表迁移并被地表物质吸收或吸附的过程称为大气酸沉降。酸沉降可以通过降水的方式进行,如雨、雪、雾和雹等,称为湿沉降;也可在气流作用下直接向地表迁移,称为干沉降。煤和油燃烧产生的硫氧化物和氮氧化物,排入大气中,与水蒸气结合,形成硫酸和硝酸雾。清洁地区降水的pH背景值大约为5.0~5.6,pH值小于5.0的降水被称为酸性降水或称酸雨。酸雨可导致森林衰退、枯死及湖泊酸化、鱼类大量死亡的现象。

3. 大气颗粒物问题(particulate matter)

分散在大气中的各种固体和液体颗粒总称为大气颗粒物(particulate matter, PM)。这些固体或液体颗粒可在空气中较长时间停留,形成相对稳定的悬浮体系,称为大气气溶胶。当分散相分别为液态、固态和液固混合态时,对应的大气气溶胶分别称为雾、烟和烟雾。

当以化石燃料为能源的火力发电厂将粉尘和飞灰等排放入大气中,会造成很多的环境问题。

(1) 降低大气能见度,如工业飞灰、细粉尘和有机气溶胶,颗粒粒径在0.1~

1. $0.1\mu\text{m}$, 对太阳光具有较强的散射作用, 这是造成大气能见度降低的主要原因。

(2) 凝结核作用, 粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的颗粒物可作为凝结核, 逐渐长成雾滴或云滴。

(3) 扩大污染范围, 如飘尘能在大气中长时间悬浮, 一般为 7~10 天, 并且能够随着气流进行远距离的输送, 对环境造成区域性的污染。气溶胶是造成污染物远距离运输的重要因素。

(4) 参与和影响大气化学反应。

(5) 影响全球气候变化。气溶胶粒子对太阳辐射具有很复杂的影响作用。

(6) 在酸沉降和富营养化中有重要影响。

(7) 损坏人体健康。大气颗粒物的粒径大小和化学组成是决定其环境影响和危害性的重要因素。飞灰中大于 $2\mu\text{m}$ 的颗粒物在鼻咽区沉积, 小于 $2\mu\text{m}$ 的颗粒物在支气管、肺泡区沉积, 之后被血液吸收, 经人体新陈代谢输送到各个器官, 对人体的健康危害很大。

4. 全球气候变化 (global climate change)

由于人类活动的影响, 自 1750 年工业革命以来全球大气中 CO_2 、甲烷和氧化亚氮等温室气体的浓度显著增加, 它们的总体效应是引起气候变暖。如果不采取积极的减排措施, 从现在起到 2100 年, 全球的平均气温将继续升高 $1.4\sim 5.8^\circ\text{C}$ 。

全球变暖将带来很多灾难: ①冰川融化, 海平面上升; ②气候剧烈变化, 极端天气频繁出现; ③生物生存面临严峻挑战, 人类面临粮食危机。

5. 水体污染 (water pollution)

天然水体作为一个开放的体系, 其化学组成是不断变化的。当能源利用过程中, 造成天然水体的物理和化学性质发生改变时, 会造成对水中生物的不良影响, 破坏相关生态系统或通过食物链进一步危害人类健康, 该过程即发生了水体污染。

水污染问题可大致划分为 4 类: 无机物污染、有机物污染、病原微生物污染和热污染。

(1) 无机污染物包括氰化物、重金属等有毒污染物, 还包括植物营养元素如氮、磷等。营养盐污染会造成水体富营养化。

(2) 有机污染物包括好氧有机物, 如碳水化合物、蛋白质、脂肪、纤维素等, 通过消耗水中的溶解氧来造成对原有生态系统的破坏; 有毒害性的有机物一般为人工合成, 如合成药物、各类工业制剂和化学农药等。

(3) 病原微生物污染, 如致病细菌、病毒、原生动物和寄生虫等造成的水体污染。

(4) 热污染, 指水体温度变化对水生生态系统造成的破坏作用。许多工业中都要使用冷却水, 如钢铁厂、炼油厂、发电厂和造纸厂等, 但带来影响最大的还是发电厂。从发电厂冷却塔流出的大量温度较高的水, 若直接排放入周围的水体中, 会使得周围水体温度骤然发生较大的变化, 一些对热敏感的植物和动物会很快被杀死, 依赖于水生食物链的生物群会整个受到影响。热污染首先会直接降低水中溶解氧, 同时会使水生生物更易受到寄生虫、致病菌和某些有毒物的侵袭。

6. 重金属问题 (heavy metals)

煤燃烧过程中释放大量的重金属, 包括硒、汞和镉等。这些重金属是具有潜在毒性的环境污染物。重金属环境化学行为最重要的两个特征是形态转化和生物累积作用。

一些重金属通过降尘迁移到周围环境中，并且在环境中难以降解，能在动物和植物体内积累、通过食物链逐步富集，浓度能成千成万甚至成百万倍地增加，最后进入人体造成危害。

7. 噪声污染 (noise pollution)

噪声污染是一种物理性污染，与水体和空气的化学污染不同。噪声污染的特点有：

(1) 物理性：声源发出的声能以波动的形式传播，直接作用于人的听觉器官，一般不致命，是一种感觉、精神公害。

(2) 难避性：由于噪声以 340m/s 的速度传播，即使闻声而跑，也避之不及。很小的孔洞缝隙就能透过大量的噪声，低频声还具有很强的绕射能力。即使在睡眠中，人耳也会受到噪声的污染。

(3) 局限性：噪声源分布面广，具有社会性，但一般的噪声源只能影响它周围的一定区域。

(4) 能量性：噪声污染是能量的污染，只造成空气物理性质的暂时变化，不具有物质的累积性。噪声源停止发声后声能很快转换成热能散失掉，污染立刻消失，没有后效和残留。噪声的能量转化系数很低， 1kW 的动力机械大约只有 1mW 变为噪声能量辐射。声能量虽然很小，但它引起空气介质的波动和由此产生的声污染却很大。

(5) 危害潜伏性：噪声污染在环境中不存在累积现象，但心理承受上有一定的延续效应，长期接触或短期高强度接触有损健康。

噪声对人们的影响可分为听觉的和非听觉的两条途径。噪声污染的危害主要包括以下方面：①损伤听力，影响人体健康；②影响人们的休息与工作，降低劳动生产率；③影响语言清晰度和通信联络；④对动物、建筑物和仪器设备也会产生不利影响。

第二节 热力环境污染的来源及核算

一、热力发电厂

1. 热力发电厂的类型

热力发电厂是生产热能并同时 will 将热能转换为电能的工厂。根据热力发电厂所用能源种类、功能、热机类型、单机容量、电厂总容量、蒸汽参数、服务性质以及电厂位置等因素，可将热力发电厂分成不同的类型，见表 1-4。通常将只生产电的热力发电厂称为火电站，既生产热又生产电的热力发电厂称为热电联产电站 (cogeneration power plant)。

2. 火力发电厂的生产流程

煤炭是世界的主要的能源，更是我国的重要能源形势。燃煤火力发电厂占热力发电厂的绝大多数。以下以燃煤机组为例，介绍热力发电厂的生产流程。燃煤热力发电厂生产的实质是能量转换，即将煤中的化学能通过锅炉中燃烧转变为蒸汽的热能，然后通过汽轮机的旋转转变为机械能，最后通过发电机转化为所需的电能。图 1-2 为常规燃煤火力发电厂生产过程示意图。

燃煤火力发电厂包括煤-烟气和汽-水两个主要的子系统，其工作过程如下：

(1) 煤-烟气侧工作流程。煤通过输煤传送带送至原煤斗，再经过磨煤机磨成很细的

表 1-4

热力发电厂的类型

分类方式	电 厂 类 型					
能源种类	化石燃料（煤、石油、天然气）	核能	垃圾	再生能源（水力、风力、生物质）	新能源（太阳能、地热能等）	磁流体
功能	供电	供电、供热	供电、供热、供煤气	多功能		
热机类型	汽轮机	内燃机	燃气轮机	燃气-蒸汽联合循环		
单机容量	小型，10MW 及以下	中型，200~300MW	大型，600MW 及以上			
电厂总容量	小容量，200MW 以下	中等容量，200~800MW	大容量，1000MW 以上	超大容量，5000MW 以上		
蒸汽参数	中低压，3.43MPa 以下	高压，8.83MPa	超高压，12.75MPa	亚临界，16.18MPa	超临界，24.2MPa 以上	超超临界，30MPa 以上
服务性质	孤立发电	企业自备电站	区域性	列车电站		
电厂位置	负荷中心	坑口、路口、港口	煤源与负荷中心之间	煤电联营		

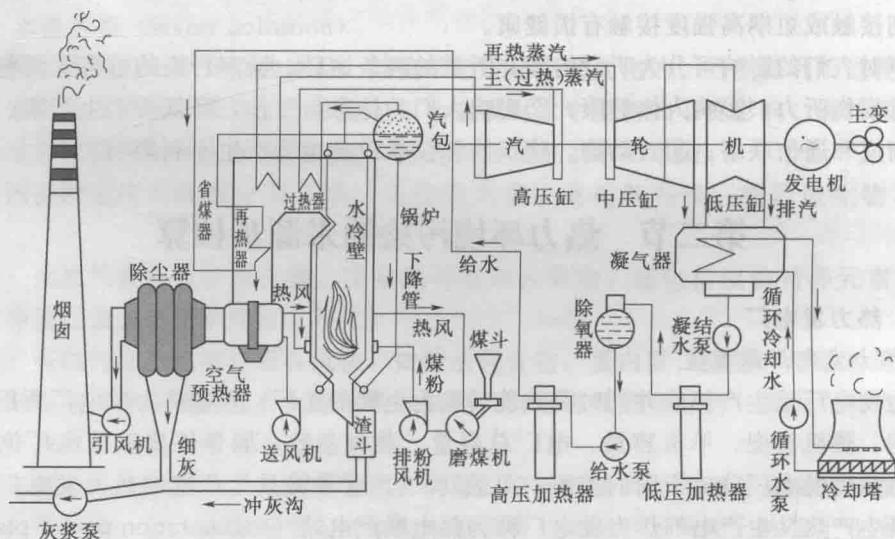


图 1-2 常规燃煤火力发电厂生产过程示意图

煤粉，煤粉经过排粉风机送入炉膛，和经过空气预热器加热的空气混合燃烧，产生的热量首先传递给水冷壁管，然后随着烟气的流动，传递给过热器、再热器、省煤器、空气预热器，烟气在除尘器中除掉绝大部分飞灰，最后通过引风机送入烟囱排入大气，如图 1-3 所示。

(2) 汽-水侧工作流程。如图 1-4 所示，凝结水经低压加热器、除氧器、高压加热器逐级加热后送入位于锅炉尾部烟道内的省煤器中接受烟气加热，然后送入汽包。汽包内的



图 1-3 煤-烟气系统工作流程示意图

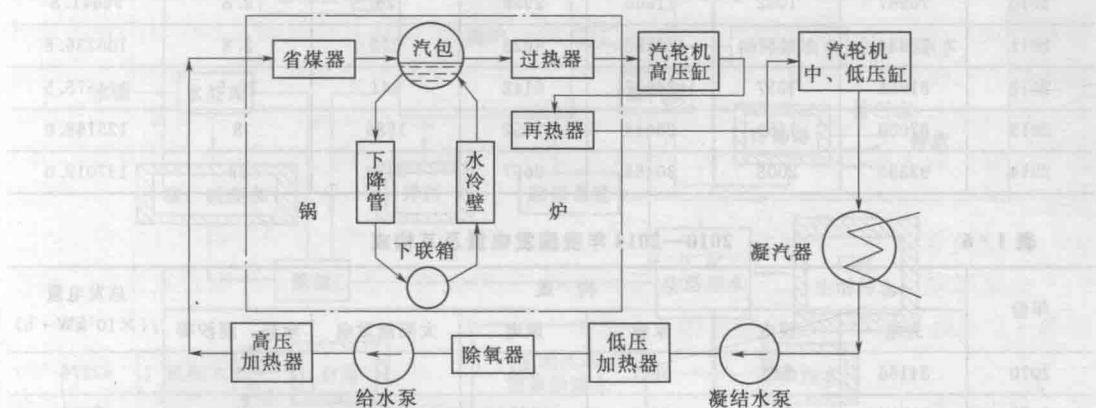


图 1-4 汽-水系统工作流程示意图

水经下降管送到锅炉下部，经联箱分配到各水冷壁，水冷壁管内的水向上流动，受热后变成汽水混合物，送回汽包，经汽水分离器分离，饱和蒸汽送入到过热器中被加热成过热蒸汽。高温高压的过热蒸汽经主蒸汽管道送到汽轮机内膨胀做功，带动发电机发电。做完功的蒸汽称为乏汽，乏汽在冷凝器内放热凝结成水，乏汽放出的热量由循环冷却水带到环境中。火力发电厂的热效率不高，只有 40% 左右，大量的热量通过凝汽器散发到环境中。

3. 我国电力生产现状

近年来我国的电力生产呈现如下特点：

(1) 装机容量和发电量都处于稳步上升趋势。2014 年，全国全口径发电装机容量为 $13.7 \times 10^8 \text{ kW}$ ，同比增长 8.7%。全国全口径发电量 $5.55 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，同比增长 3.6%。另外，全国发电设备利用小时数为 4286h（发电设备利用小时数为 6000kW 及以上电厂统计口径），为 1978 年以来的年度最低水平，同比降低 235h，而且仍有继续下降的趋势。

(2) 火力装机容量和发电量占比高，但近年火电发电量出现负增长。2014 年，全国全口径火电发电量 $4.17 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，同比下降 0.7%，受电力消费需求放缓、非化石能源发电量高速增长等因素影响，火电发电市场萎缩，火电发电量自 1974 年以来首次出现负增长。即使如此，2014 年火电装机容量占总装机容量比重仍高达 67.4%，火电发电量占总发电量 75.4%。