

“十一五”国家重点图书出版规划项目



国家重点基础研究发展计划

燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术
基础研究学术丛书

燃煤可吸入颗粒物的 形成与排放

徐明厚 于敦喜 刘小伟 著



科学出版社

www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

“十一五”国家重点图书出版规划项目

燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术基础研究学术丛书

燃煤可吸入颗粒物的 形成与排放

徐明厚 于敦喜 刘小伟 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

大气可吸入颗粒物是目前我国城市空气的首要污染物,不仅对环境产生了严重的影响,而且对人体健康等造成了广泛的损害。煤的燃烧是大气可吸入颗粒物的主要来源之一,燃煤可吸入颗粒物的形成与排放控制的研究已经成为燃烧研究中的一个新兴而前沿的领域,成为政府部门和科研工作者愈来愈关切的热点。本书系统地阐述了煤燃烧过程中可吸入颗粒物的形成与燃烧后的排放特征,简要介绍了可吸入颗粒物的特征、危害以及可吸入颗粒物形成与排放控制研究的最新进展与相关法规,论述了煤粉特性、煤焦特性、燃烧工况等对燃煤可吸入颗粒物形成的不同影响,详细介绍了燃煤可吸入颗粒物取样装置、计算机控制的扫描电子显微镜(CCSEM)等分析方法在燃煤可吸入颗粒物研究中的应用、燃煤可吸入颗粒物形成模式识别的新方法等;同时,书中还对燃煤可吸入颗粒物形成的数值模拟方法与结果、实际燃煤电站锅炉可吸入颗粒物排放特性的测试分析以及煤与生物质混烧中可吸入颗粒物的形成与排放特性的最新研究成果进行了论述。

本书可作为高等学校热能工程、工程热物理、环境工程、化学工程等专业的教师、研究生和本科生的教学和学习用书,也可供电力科研院所、大气环境保护部门、火力发电厂等单位从事能源、环境、冶金、建材、化工等专业的相关科研、工程技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃煤可吸入颗粒物的形成与排放/徐明厚,于敦喜,刘小伟著. —北京:科学出版社,2009

(燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术基础研究学术丛书)

ISBN 978-7-03-023060-7

I. 燃… II. ①徐…②于…③刘… III. 煤烟污染-粒状污染物-污染防治-研究 IV. X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 149453 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:刘小梅
责任印制:赵 博 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009年6月第一次印刷 印张:20 3/4

印数:1—2 000 字数:397 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

《燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术 基础研究学术丛书》序

进入 21 世纪以来,我国能源结构仍以矿物能源为主,煤炭和石油的消耗在很长时期内仍位居前列,由燃煤引起的 SO_2 、 NO_x 和颗粒物仍是我国城市大气的主要污染来源。研究表明:我国大城市的主要污染物中,50%~60%是由燃煤和机动车燃油引起的,特别是细粒子部分,其比例更高。尽管近年来各地都采取了一系列改善环境的措施,城市总悬浮颗粒物和可吸入颗粒物的总体污染情况有所好转,但是, $\text{PM}_{2.5}$ 特别是亚微米颗粒物的总量却没有下降,而是有所上升,这说明我国城市大气的主要污染物正在转向更细的颗粒物。因此,针对燃烧源排放的细微颗粒物的研究势在必行。

在科技部的支持下,围绕国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目——“燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术基础研究”(2002CB211600)组建了一支高水平的学术研究团队。经过五年的项目研究,他们在颗粒物的形成与控制基础两个方面都取得了重要的阶段性成果。这支团队由清华大学、北京大学、天津大学、华中科技大学、东南大学和中国环境科学研究院组成,每年举行一次超过 100 人的项目学术会议,形成了良好的学术交流氛围。在此项目研究期间,第一课题负责人郝吉明当选为中国工程院院士,第二课题负责人徐明厚成为“长江学者奖励计划特聘教授”和国家杰出青年科学基金获得者,首席科学家姚强在“十五”计划期间担任国家 863 洁净煤主题专家组成员、“十一五”计划 863 先进能源技术领域专家组成员兼工业领域节能减排总体专家组组长。

通过项目的研究,该学术团队提出了用于燃烧源颗粒物的采样、处理与分析的方法,例如,针对不同源与多种颗粒特性的撞击分离采样与分析系统、模拟大气过程的气溶胶综合反应箱、以显微 PIV 技术为核心的颗粒物在不同场中的运动规律的研究方法;研制搭建了一批具有国际先进水平的实验台架与测试仪器,例如,以全气缸取样为核心的柴油发动机颗粒物研究实验台,一维多燃料燃烧过程颗粒物形成与控制实验台, LII 炭黑形成与控制测量系统和煤的沉降炉实验台等。

到目前为止,关于此 973 计划项目取得主要研究成果如下:

(1) 完成了不同燃料、不同燃烧方式的 20 多种典型的固定源和 10 多种移动燃烧源（柴油车和汽油车）的可吸入颗粒物的粒径分级分布特性、形貌结构特性、主量化学组成、重金属富集特性和有机污染物在不同颗粒物上的富集特性等的研究；对我国燃用两种典型煤种的电厂各项目组进行了联合测试，获得了大量有关我国主要燃烧源可吸入颗粒物的基础数据；同时还进行了大量的实验室基础研究，获得了我国主要典型燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特性及其形成的基本规律。

(2) 通过对不同外部条件下可吸入颗粒物的多相流动、传热、传质与生长的规律的研究，以及在声场、电场、热温度场、磁场、相变环境、化学凝聚环境、自然环境等多种不同外力条件下的作用规律的实验和理论研究，首次获得了微米级颗粒在不同频率、不同声强的声场中不同位置的运动轨迹和团聚颗粒的运动轨迹，提出了一种确定粒径的新方法，并提出了相变、化学凝聚和预涂层技术等多个使颗粒团聚的技术研究方向。

(3) 通过实验与模型分析计算，建立了以通用颗粒物方程为基础的颗粒物在燃烧过程与降温排放过程中的气—液—固相互转化的物理化学机制，包括气化、成核、长大、非均相反应、团聚等的形成与转化规律。研究包括了复杂的物理化学过程，如各种物质的挥发与转化行为，半挥发性和挥发性组分，特别是有机污染物的变化行为等，发现了燃烧源颗粒的三模态特性可以用铝元素作为标志性元素进行相关的表征，很好地解释了中间模式形成的机理。

(4) 根据可吸入颗粒物在产生、运动与演化过程中发生的一系列碰撞和团聚，很好地预测了在降水过程中不同颗粒物的湿沉降，获得了炭烟（soot）形成过程的机理与主要影响因素，以及前体物在环境大气条件下转化为颗粒物的主要影响因素（包括温度、湿度等条件），并提出了在柴油机燃烧条件下控制炭烟形成的主要因素。

(5) 通过采用先进的在线观测技术研究颗粒物在大气环境中的演变规律，对细和超细粒子数浓度谱分布的连续在线观测发现了北京新粒子的形成，对北京大气中二次颗粒物的形成规律有了新的认识。

(6) 通过对不同荷电颗粒运动的研究，发现了荷电颗粒物在两相流动中两两相关的互相吸引、排斥、缠绕等规律；通过对微米级颗粒在碰撞与团聚的动力学过程的研究，发现了形成颗粒层结构与颗粒荷电、颗粒其他特性的关系，提出了微米颗粒动力学研究的新方法，为新型的电袋联合脱除技术的发展提供了基础数

据,指明了新的研究方向(此方向已获得科技攻关计划的支持)。

(7)通过对内燃机颗粒物的过滤、催化氧化、等离子氧化等基本规律的研究,形成了具有催化过滤和等离子再生两项技术途径的颗粒物脱除与再生的新方法。

作为这一项目专家组的成员,本人一直跟踪这一项目的进展情况,上述成果表明将这一问题列入国家重大基础研究计划的正确性。这次科学出版社与项目组合作,共同将上述主要成果体现在一套丛书之中,是一件非常有意义的事。这套丛书是对五年基础研究成果的一个总结,为读者提供了关于燃烧源颗粒物从形成到排放控制的系统知识。丛书介绍了该项目最具代表性的研究方法、研究手段和研究成果,同时在编写上既考虑了专业研究人员的需要,又考虑了普通读者的需求。整套丛书系统性和针对性强,对未来从事颗粒物形成、排放与控制的研究和技术开发的科技人员有着重要的参考价值。衷心希望研究工作能够继续深入,愿本丛书的出版对读者了解燃烧源颗粒物的形成规律和控制技术有所帮助,并进一步推动该领域的研究和技术发展。

徐旭常

中国工程院院士

2008年5月于清华大学

前 言

大气可吸入颗粒物是目前我国城市空气的首要污染物，不仅对环境产生了严重的影响，而且对人体呼吸系统、心血管系统、神经系统和生殖系统等造成了广泛的损害。煤的燃烧是大气可吸入颗粒物的主要来源之一，燃煤可吸入颗粒物的形成与排放控制的研究已经成为燃烧研究中的一个新兴而前沿的领域。

本书即是一本从可吸入颗粒物性质与危害入手，以燃煤可吸入颗粒物的形成、排放特征为主线，阐述煤燃烧过程中可吸入颗粒物的形成、模态识别以及煤的特性、燃烧工况条件等对可吸入颗粒物排放的影响的学术专著。本书取材于作者及其科研组的科研成果，主要涉及燃煤可吸入颗粒物在燃烧过程中的生成与燃烧后的排放特征两大部分。

鉴于燃煤可吸入颗粒物的形成与排放特征的研究是一个新兴的前沿研究领域，相关工作也是近年才逐渐展开，国内外尚没有可供参考的相关学术著作的具体情况，本书在内容安排上注重系统性：首先简要介绍可吸入颗粒物的特征、危害，阐述可吸入颗粒物形成与排放控制研究的最新进展与相关法规，进而论述燃煤可吸入颗粒物形成的不同影响因素，包括煤粉特性、煤焦特性、燃烧工况等；根据可吸入颗粒物取样难、分析难、识别难的特点，详细述及了著者在相关实验中开发、采用的可吸入颗粒物取样装置，计算机控制的扫描电子显微镜（CCSEM）等分析方法在燃煤可吸入颗粒物研究中的应用，燃煤可吸入颗粒物形成模态识别的新方法等；在实验室试验方法、成果介绍的同时，对燃煤可吸入颗粒物形成的数值模拟方法与结果、多台实际燃煤电站锅炉可吸入颗粒物排放特性的测试、分析结果进行了论述；最后，简要介绍了有关煤与生物质混烧中可吸入颗粒物的形成与排放特性的最新研究成果。

在写作上，本书注意深入浅出。在介绍新概念、新方法的同时，适当述及与介绍相关背景知识，但是避免长篇累赘地重复已有知识，重点对相关的新概念、新方法进行阐述，对利用这些新方法取得的研究成果进行翔实的介绍。

本书涉及的研究内容得到国家重点基础研究发展规划项目课题（2002CB211602、2005CB724905）、国家杰出青年科学基金（50325621）、国家自然科学基金（90610017、50721005、50720145604、20277014）、高等学校学科创新引智计划（“111”计划 B06019）、教育部博士点基金（20050487014）、湖北省自然科学基金（2006ABC002）等的资助；本书的出版得到国家科学技术学术著作出版基金委员会的资助，作者在此一并表示衷心的感谢！

本书由徐明厚、于敦喜、刘小伟等共同撰写，其中第 1、8、11 章由徐明厚撰写，第 2 章由于敦喜、徐明厚撰写，第 3、6、7、9 章由于敦喜撰写，第 4、5 章由刘小伟、徐明厚撰写，第 10 章由徐明厚、刘小伟撰写。全书由徐明厚定稿。高翔鹏硕士参与了本书资料整理和部分章节的初稿准备工作；隋建才博士参与了第 8 章的初稿撰写工作；王泉斌博士生、姚洪教授参与了第 11 章的初稿撰写工作。书中的内容是著者多年来的研究思索与成果的总结，同时包括了曾经或者还在研究组学习与工作的研究生们的研究成果。他们是：韩军博士、隋建才博士、乔瑜博士、易帆硕士、黄建辉硕士、李庚硕士、俞云硕士、夏永俊硕士、曹倩硕士、郝炜硕士、蔡攸敏硕士、赵锋硕士、戴立硕士、黄永琛硕士，在读博士生龚勋、罗光前、吕当振。再此，谨向他们致以由衷的谢意！与承担国家重点基础研究发展规划项目课题（2002CB211602、2002CB211601）的煤燃烧国家重点实验室的同事柳朝晖教授、张军营教授、姚洪教授、赵海波副教授、郭欣副教授、刘晶副教授的共事是非常愉快的，他们对著者的研究给予了极大的支持，和他们的讨论给予著者诸多启迪。在此向他们致以深切的谢意！

我们希望本书能为读者在燃煤可吸入颗粒物的生成与排放的有效控制的研究之间架设一座桥梁。如果本书对从事洁净煤燃烧与利用的科技工作者、教育界的同行、环境保护工作者以及研究生等有所借鉴和帮助，我们将感到无比欣慰。限于著者的知识视野和学术水平，书中难免存在不当之处，恳请读者批评、指正。

谨以此书献给理解与默默支持着我们的家人与朋友张琳女士、程小芳女士、陈燃女士！

目 录

《燃烧源可吸入颗粒物的形成与控制技术基础研究学术丛书》序

前言

1 绪论	1
1.1 可吸入颗粒物的特征及其危害	2
1.1.1 可吸入颗粒物的基本特征	2
1.1.2 可吸入颗粒物对人体及环境的危害	5
1.2 可吸入颗粒物排放控制的相关法规	10
1.2.1 国内对可吸入颗粒物排放控制的相关法规	10
1.2.2 国外对可吸入颗粒物排放控制的相关法规	11
参考文献	13
2 燃煤颗粒物的形成与排放研究进展	16
2.1 研究背景	16
2.2 研究现状及存在的问题	17
2.2.1 煤中矿物质的空间分布及其转化机理	18
2.2.2 亚微米颗粒 (PM_{10}) 的形成	21
2.2.3 残灰颗粒的形成	30
2.2.4 电厂颗粒物的形成与排放	36
2.3 本书关注的科学问题	37
参考文献	38
3 煤焦特性对颗粒物形成的影响	49
3.1 实验研究	49
3.1.1 实验与分析	49
3.1.2 结果与讨论	51
3.2 模拟研究	58
3.2.1 煤焦破碎模型的建立	60
3.2.2 煤焦初始孔隙分布	63
3.2.3 煤焦破碎与燃烧反应性	66
3.2.4 颗粒物形成模型的建立	70
3.2.5 无孔煤焦燃烧时颗粒物的形成	72
3.2.6 多孔煤焦的破碎与颗粒物数目的关系	74

3.2.7	多孔煤焦的破碎与颗粒物粒径的关系	75
3.2.8	颗粒物粒径随转化率的变化	76
3.3	主要结论	79
	参考文献	80
4	煤粉特性对可吸入颗粒物形成的影响	84
4.1	引言	84
4.2	煤粉粒径对可吸入颗粒物形成的影响	84
4.2.1	实验方法	84
4.2.2	煤粉粒径对超微米颗粒物排放量的影响	87
4.2.3	煤粉粒径对亚微米颗粒物排放量的影响	88
4.3	灰中元素含量对可吸入颗粒物元素构成的影响	89
4.3.1	灰分含量对超微米颗粒物排放量的影响	89
4.3.2	灰成分与颗粒物元素构成	90
4.4	煤粉密度对可吸入颗粒物形成的影响及其机理分析	92
4.4.1	浮沉实验方法	92
4.4.2	煤粉密度对颗粒物排放量的影响	94
4.5	元素钠赋存形态对亚微米颗粒物形成的影响及其机理分析	102
4.5.1	实验方法	102
4.5.2	热解过程中 Na 元素赋存形态对其气化行为的影响	106
4.5.3	燃烧过程中 Na 元素在亚微米颗粒物中的分布	111
4.6	特定外在矿物质破碎对可吸入颗粒物形成的影响	112
4.6.1	煤中主要矿物赋存形式	112
4.6.2	特定外在矿物质的化学转化	114
4.6.3	特定外在矿物质的破碎实验	114
4.7	主要结论	119
	参考文献	120
5	燃烧工况对可吸入颗粒物形成的影响	122
5.1	引言	122
5.2	炉膛温度对可吸入颗粒物形成的影响	122
5.2.1	炉膛温度对超微米颗粒物排放量的影响	122
5.2.2	炉膛温度对亚微米颗粒物排放量的影响	123
5.3	燃烧实验系统燃煤颗粒物元素构成	124
5.3.1	颗粒物元素分布	124
5.3.2	亚微米颗粒物和超微米颗粒物元素构成的对比分析	126
5.3.3	炉膛温度对元素气化程度的影响	127

5.3.4 元素气化形态的化学热力学研究	128
5.4 氧气含量对可吸入颗粒物形成的影响	136
5.4.1 氧气含量对超微米颗粒物排放量的影响	136
5.4.2 氧气含量对亚微米颗粒物排放量的影响	138
5.4.3 氧气含量对颗粒物元素构成的影响	139
5.5 主要结论	141
参考文献	142
6 燃煤可吸入颗粒物模态的有效识别	143
6.1 引言	143
6.2 实验方案及样品分析	144
6.2.1 实验系统	144
6.2.2 煤种选择及基本特性	145
6.2.3 实验工况及过程	146
6.2.4 样品分析	146
6.3 颗粒物的质量粒径分布	147
6.4 颗粒物三模态的有效识别及其形成机理分析	148
6.4.1 理论基础	148
6.4.2 基于 Al 元素粒径分布的颗粒物模态识别	149
6.4.3 燃煤颗粒物中间模态的普遍性	151
6.4.4 超细模态的形成机理	153
6.4.5 粗模态的形成机理	154
6.4.6 中间模态的可能形成机理	155
6.4.7 颗粒物模态识别理论的合理性验证	159
6.5 主要结论及其重要意义	161
参考文献	162
7 中间模态颗粒物的形成机理	165
7.1 引言	165
7.2 实验过程及样品表征	165
7.2.1 物理筛分	166
7.2.2 密度分级	166
7.2.3 实验系统及实验工况	166
7.2.4 样品表征	167
7.3 颗粒物模态的分布特征	167
7.4 煤粒破碎在中间模态形成中的重要作用	170
7.5 煤中细小颗粒的燃烧转化对中间模态的贡献	177

7.6	煤中外在矿物颗粒的燃烧转化对中间模态的贡献	181
7.7	主要结论	185
	参考文献	185
8	燃煤亚微米颗粒物形成的数值模拟	191
8.1	燃煤过程中矿物质气化的模拟研究	191
8.1.1	燃煤过程中矿物质气化数值模拟的研究现状	191
8.1.2	煤中矿物质气化模型	192
8.1.3	煤中矿物质气化影响因素的模拟研究	198
8.1.4	单角炉内煤灰气化的模拟	203
8.2	燃煤过程中亚微米颗粒形成的模拟研究	211
8.2.1	热力学平衡计算分析	212
8.2.2	燃煤过程中亚微米颗粒动力学特性	213
8.2.3	亚微米颗粒形成、生长的数学模型	220
8.2.4	四角切圆锅炉燃煤过程中亚微米颗粒形成的计算	222
	参考文献	229
9	燃煤颗粒物形成的 CCSEM 研究	232
9.1	引言	232
9.2	样品制备及 CCSEM 分析	233
9.2.1	样品的制备	233
9.2.2	CCSEM 样品准备	233
9.2.3	CCSEM 分析过程	233
9.2.4	CCSEM 数据处理	234
9.3	煤中矿物含量与空间分布的非均一性	236
9.4	煤中矿物粒径分布的非均一性	239
9.5	矿物的物理转化与颗粒物的形成	240
9.6	矿物的化学转化与颗粒物的形成	243
9.7	主要元素的燃烧转化与颗粒物的形成	249
9.8	主要结论	256
	参考文献	257
10	燃煤电站锅炉可吸入颗粒物的排放特性	260
10.1	燃煤电站锅炉颗粒物的取样方法	260
10.1.1	EPA 的标准取样方法	260
10.1.2	新型取样方法	261
10.2	燃煤电站锅炉颗粒物的排放特性	262
10.2.1	燃煤电站锅炉颗粒物的质量粒径分布	262

10.2.2 燃煤电站锅炉除尘器入、出口的颗粒组成特性	270
10.2.3 除尘器对不同粒径煤灰颗粒的脱除效率	273
10.2.4 燃煤电站锅炉运行工况对颗粒物排放的影响	274
10.3 燃煤电站锅炉颗粒物的物理化学特征	278
10.3.1 物理特征	278
10.3.2 化学特征	279
10.4 排放因子的研究	286
10.4.1 国内外有关排放因子的研究	286
10.4.2 排放因子的计算	287
10.4.3 颗粒物排放因子的影响因素	289
10.4.4 对我国火电厂颗粒物新排放限值的建议	290
10.5 主要结论	291
参考文献	291
11 生物质与煤混烧过程中可吸入颗粒物的形成及排放	294
11.1 生物质燃烧过程中 PM 的形成与排放	294
11.1.1 生物质组成特性	294
11.1.2 生物质热解及燃烧特性分析	298
11.1.3 生物质燃烧 PM 排放特性分析	304
11.2 煤与生物质混烧过程中 PM 的形成与排放	308
11.2.1 燃料特性	308
11.2.2 实验装置及条件	309
11.2.3 煤与生物质混烧生成的 PM_{10} 质量粒径分布	309
11.2.4 燃烧气氛对煤与生物质混烧后 PM_{10} 排放的影响	310
11.2.5 煤与生物质混烧后 PM_{10} 中典型元素分布	311
参考文献	314

1 绪 论

大气颗粒物 (particulate matter, PM) 是指分散在空气中的固态和液态颗粒物质。由于 PM 构成复杂, 不同国家不同时期环保法规对 PM 关注的重点有所不同, 通常以空气动力学直径为标准对大气颗粒物进行细致划分, 相关定义介绍如下。

空气动力学直径 (aerodynamic diameter), 亦称气体动力学当量直径 (aerodynamic equivalent diameter), 是表述粒子运动的一种假想粒径, 其定义为: 单位密度 ($\rho_0 = 1\text{g/cm}^3$) 的球体, 在静止空气中做低雷诺数运动时, 达到与实际粒子相同的最终沉降速度 (v_s) 时的直径。采用空气动力学直径也就是将实际的颗粒粒径换成具有相同空气动力学特性的等效直径 (或等当量直径)。通常难以测得实际颗粒的粒径和密度, 而空气动力学直径可直接由动力学的方法测量求得, 这可使不同形状、密度、光学与电学性质的颗粒粒径具有统一的量度。

悬浮颗粒物 (suspended particulate matter, SPM): 为所有大气颗粒物的通用术语^[1]。

大气气溶胶 (aerosol): 一般指在广义大气 (包围地球的全部空气) 中的悬浮颗粒物^[2]。

总悬浮颗粒物 (total suspended particulate, TSP): 指大气中 $100\mu\text{m}$ 以下的颗粒^[3]。

PM_{10} : 指空气动力学直径小于或等于 $10\mu\text{m}$ 的大气颗粒物, 它们可以通过呼吸系统进入人体, 因此也称为可吸入颗粒物 (inhalable particulate, IP)^[1]。

$\text{PM}_{2.5}$: 指空气动力学直径小于或等于 $2.5\mu\text{m}$ 的大气颗粒物, 它们能够进入人体肺泡, 故此也称可入肺颗粒物 (respirable particulate matter, RPM)^[1]。

炭黑 (carbon black): 指工业生产过程产生的或由天然森林火灾产生的、由粒径在 $10\sim 1000\text{nm}$ 的球粒和复合颗粒组成的碳质物质, 一般是化学燃料不完全燃烧所致。

大气颗粒物中可吸入颗粒物是目前我国城市空气的首要污染物^[4], 对环境 (城市空气质量、大气能见度、温度和降水酸碱度等) 产生了严重的影响, 同时对人体呼吸系统、心血管系统、神经系统和生殖系统等造成了广泛的损害。大气颗粒物的源解析表明, 煤粉燃烧是大气中可吸入颗粒物的主要来源之一^[5~10]。目前, 我国燃煤机组容量占发电装机总容量的 70% 以上, 火力发电用煤量占全国煤炭总量的 50% 左右^[11], 由于我国电站锅炉热效率偏低, 并且劣质煤占有较大比重, 经折算, 燃煤电站排放的颗粒物总量为 $6.34\sim 7.92$ 万 t/a ^[12], 给我国

大部分城市造成了严重的煤烟型污染。因此，研究燃煤可吸入颗粒物的形成、特性、危害和控制已经迫在眉睫。本章将就可吸入颗粒物的特征、危害及其国内外相关法规做简要介绍，以期为读者提供必要的基础知识。

1.1 可吸入颗粒物的特征及其危害

1.1.1 可吸入颗粒物的基本特征

1. 可吸入颗粒物的来源

源解析技术是指对大气颗粒物的来源进行定性或定量研究的技术，其目的是确定大气颗粒物的来源以及不同来源对其贡献的大小，为有关部门控制颗粒物污染源提供依据。可吸入颗粒物的来源可分为自然源和人为源：自然源包括植物花粉和孢子、土壤扬尘、海盐等；人为源又可分为固定源和移动源，前者如燃料燃烧、工业生产过程，后者如交通运输等。大气颗粒物的来源和发生量会因不同国家和地区的经济发展、能源结构、工艺方法以及管理水平的不同而存在很大的差别。

国外学者通过受体模型对澳大利亚布里斯班的 PM_{10} 进行了源解析研究，结果表明 PM_{10} 的质量分布主要是扬尘、机动车尾气（不包括二次污染物）、海盐、富钙和钛化合物（来自固结或矿物处理工厂）、生物体的燃烧、元素碳和二次污染物。近十年来，国内学者对抚顺、杭州、银川、济南、重庆、武汉等城市的大气颗粒物进行了源解析研究^[5~10]，其结果见表 1.1。由表 1.1 可知，燃煤烟尘是各城市 PM_{10} 的主要来源之一，其对 PM_{10} 的贡献率为 20.0%~44.5%。还有文献直接指出^[13]，使城市上空蓝天消失的罪魁祸首是可吸入颗粒物，而我国可吸入颗粒物主要源于燃煤电厂，因为即使采用了粉尘收集率很高的除尘装置，还是会有少量粉尘排入大气，其中绝大部分就是可吸入颗粒物。

表 1.1 不同城市 PM_{10} 的源解析

城 市	主要排放源对 PM_{10} 的贡献率/%					
	燃煤尘	建筑尘	土壤尘	冶炼尘	其他源	合计
抚顺	44.5	0.5	35.0	8.3	11.7	100
杭州	26.2	22.5	6.4	3.8	41.1	100
银川	29.3	10.1	35.5	5.3	19.8	100
济南	26.0	12.0	34.0	17.0	11.0	100
重庆	36.4	4.2	22.4	28.0	9.0	100
武汉	20.0	22.0	40.0	5.0	13.0	100

2. 粒径分布

粒径分布是指某一颗粒群中不同粒径的颗粒所占的比例，颗粒物的所有物理

化学性质都与粒径有关,而某些性质则非常强烈地依赖于颗粒尺寸,因此大气颗粒物粒度的时空分布规律一直是人们关注的焦点之一^[14]。大气可吸入颗粒物的粒径分布近似呈对数分布,微分质量图呈现多峰值多模态结构,一般有三个峰值三个模态:粒径大于 $2\mu\text{m}$ 为粗颗粒,粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 为爱根核模,粒径在 $0.1\sim 2\mu\text{m}$ 之间为积聚态模,爱根核模和积聚态模合起来为细颗粒,积分质量图呈现的是几段直线,表明有几个不同的来源。

不同地区、不同季节以及不同时间,颗粒物的粒度分布也有所不同,同时 $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占的质量百分比也不同。例如, Eldred 等^[15]的研究表明,美国西部 $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 的 $1/2$,东部为 $2/3$,并且东部 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度远高于西部。Motallebi^[16]发现, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度变化趋势为冬季高,夏季低,且低温、低风速、低逆温层和相对湿度较大时, PM_{10} 的浓度更高。然而 Parkhurst 等^[17]的结论则相反,他们在对美国东部一些城市大气颗粒物的研究中得出, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的值在夏季高,冬季低,其平均值为 67% 。在我国台湾省的研究表明,其中部和北部 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 的值为 $61\%\sim 67\%$,南部为 $54\%\sim 59\%$,而台湾省内各大城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的比例波动很大。在广州、武汉、兰州、重庆等地的研究^[18]表明,广州城区 $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 的百分比为 $64.7\%\sim 66.1\%$,武汉城区 $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 的百分比为 $52.6\%\sim 60.5\%$,兰州城区 $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 的百分比为 $51.6\%\sim 51.9\%$,重庆城区 $\text{PM}_{2.5}$ 占 PM_{10} 的百分比为 $61.8\%\sim 65.1\%$ 。

3. 空气动力学特性

可吸入颗粒物的空气动力学特性取决于粒径, $10\mu\text{m}$ 的颗粒在标准状况下沉降速度可以达到 2.4cm/s ,直径为 $6\mu\text{m}$ 的颗粒的沉降速度为 0.216cm/s ,直径为 $0.2\mu\text{m}$ 的颗粒的沉降速度仅为 $2.4\mu\text{m/s}$ ^[14]。表 1.2 给出了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的某些特性。由表 1.2 可知,细颗粒在空气中的寿命长,可达数天至数月;传输距离远,可达几百公里至几千公里,细颗粒的污染是区域性的。吴国平等^[18]的研究表明, PM_{10} 的污染在城区明显高于郊区,而 $\text{PM}_{2.5}$ 在城区和郊区之间差异较小,说明城区细颗粒物已输送到郊区。

表 1.2 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 某些特性的比较^[10]

特 性	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}
来源	燃烧产物、高温过程产物、空气二次反应物	土壤、机械破碎物、雾滴蒸发物
组成	SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、Pb、Cd、Ni、Zn、V、Cu、EC、OC、键合水	浮沉、地壳元素 Si、Al、Fe、Ti 氧化物、化石燃料的飞灰、 CaCO_3 、NaCl、动植物碎屑

续表

特 性	PM _{2.5}	PM ₁₀
在空气中的寿命	数天~数月	数分钟~数小时
输送距离	数百~数千公里	小于一公里~数十公里
危害	对人危害大	对上呼吸道有不利影响

4. 物理化学特征

可吸入颗粒物的特征可以概括为：形态各异、成分复杂。大气颗粒物是多源颗粒的混合体，不同源的颗粒物形态不同，如图 1.1 所示^[19]。煤尘一般为圆形、不透明实体，表面较光滑；燃油或汽车尾气的颗粒为不规则的圆形体，表面高低不平。不同形态的颗粒物对机体的作用不同，球形颗粒易于沉降，而不规则颗粒物的机械损伤作用较大。隋建才^[20]对某 100MW 燃煤锅炉机组除尘器出口的颗粒物形态进行了分析，如图 1.2 所示。由图 1.2 可知，亚微米颗粒（粒径小于 1 μ m 的颗粒）主要由比较规则的球形颗粒组成 [见图 1.2(a)]，这些颗粒主要是煤中矿物质经过气化、成核、凝结及凝聚等过程形成的^[21]，同时也有少量不规则含碳颗粒聚结在一起形成链状颗粒 [见图 1.2(b)]。而超微米颗粒（粒径大于

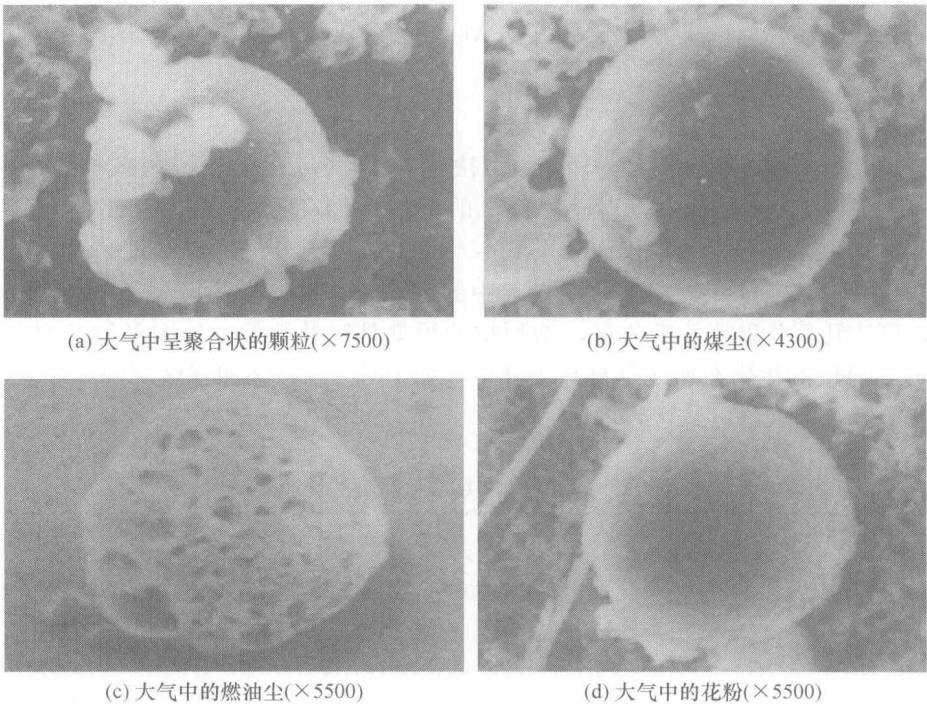


图 1.1 不同源颗粒物的典型形貌