



能源与环境出版工程

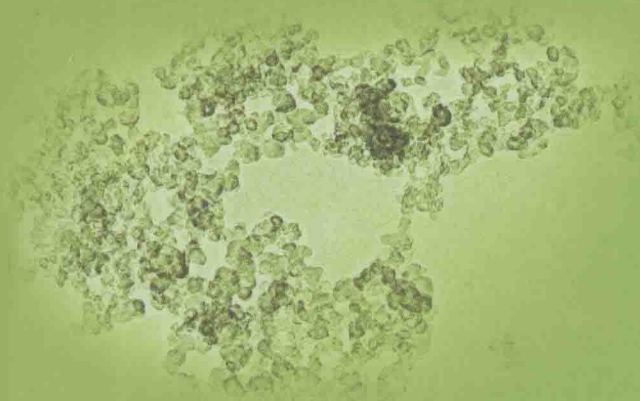
总主编 翁史烈

上海科技专著出版资金资助

机动车可吸入颗粒物 排放与城市大气污染

Motor Vehicle Inhalable Particle
Emission and Urban Air Pollution

黄震 吕田 李新令 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



能源与环境出版工程

总主编 翁史烈

上海科技专著出版资金资助

机动车可吸入颗粒物 排放与城市大气污染

Motor Vehicle Inhalable Particle
Emission and Urban Air Pollution

黄震 吕田 李新令 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书针对机动车颗粒物排放与城市大气污染,系统论述了机动车颗粒物污染特征,欧美和中国机动车排放法规与机动车颗粒物排放的测试与分析方法,深入探讨了稀释过程对机动车排气颗粒物的影响,压燃式发动机颗粒物排放的主要成分与粒径分布特征,压燃式发动机颗粒物排放形貌、内部结构及其氧化性,机动车颗粒物道路排放特征及其对环境的影响,高速公路环境大气颗粒物理化特性及其来源解析,揭示了机动车颗粒物排放与城市大气污染的关系。

本书可作为高等学校能源与环境类专业教学与科研参考书,也可供从事汽车发动机研发和从事大气污染控制的相关研究、工程技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染/黄震,吕田,李新令著. —上海:

上海交通大学出版社,2014

ISBN 978-7-313-10398-7

I. ①机… II. ①黄…②吕…③李… III. ①城市—汽车排气污染—粒状
污染物—研究②城市空气污染—研究 IV. ①U471.23②X734.201③X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 243952 号

机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染

著 者:黄 震 吕 田 李新令

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:上海天地海设计印刷有限公司

开 本:789mm×1092mm 1/16

字 数:270 千字

版 次:2014 年 12 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-10398-7/U

定 价:68.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:13.5 插页:6

印 次:2014 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-33872559

能源与环境出版工程 丛书学术指导委员会

主 任

杜祥琬(中国工程院原副院长、中国工程院院士)

委 员(以姓氏笔画为序)

苏万华(天津大学教授、中国工程院院士)

岑可法(浙江大学教授、中国工程院院士)

郑 平(上海交通大学教授、中国科学院院士)

饶芳权(上海交通大学教授、中国工程院院士)

闻雪友(中国船舶工业集团公司 703 研究所研究员、中国工程院院士)

秦裕琨(哈尔滨工业大学教授、中国工程院院士)

倪维斗(清华大学原副校长、教授、中国工程院院士)

徐建中(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

陶文铨(西安交通大学教授、中国科学院院士)

蔡睿贤(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

能源与环境出版工程 丛书编委会

总主编

翁史烈(上海交通大学原校长、教授、中国工程院院士)

执行总主编

黄 震(上海交通大学副校长、教授)

编 委(以姓氏笔画为序)

马重芳(北京工业大学环境与能源工程学院院长、教授)

马紫峰(上海交通大学电化学与能源技术研究所教授)

王如竹(上海交通大学制冷与低温工程研究所所长、教授)

王辅臣(华东理工大学资源与环境工程学院教授)

何雅玲(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室主任、教授)

沈文忠(上海交通大学凝聚态物理研究所副所长、教授)

张希良(清华大学能源环境经济研究所所长、教授)

骆仲泐(浙江大学能源工程学系系主任、教授)

顾 璠(东南大学能源与环境学院教授)

贾金平(上海交通大学环境科学与工程学院教授)

徐明厚(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室主任、教授)

盛宏至(中国科学院力学研究所研究员)

章俊良(上海交通大学燃料电池研究所所长、教授)

程 旭(上海交通大学核科学与工程学院院长、教授)

总 序

能源是经济社会发展的基础,同时也是影响经济社会发展的主要因素。为了满足经济社会发展的需要,进入 21 世纪以来,短短十年间(2002—2012 年),全世界一次能源总消费从 96 亿吨油当量增加到 125 亿吨油当量,能源资源供需矛盾和生态环境恶化问题日益突显。

在此期间,改革开放政策的实施极大地解放了我国的社会生产力,我国国内生产总值从 10 万亿元人民币猛增到 52 万亿元人民币,一跃成为仅次于美国的世界第二大经济体,经济社会发展取得了举世瞩目的成绩!

为了支持经济社会的高速发展,我国能源生产和消费也有惊人的进步和变化,此期间全世界一次能源的消费增量 28.8 亿吨油当量竟有 57.7% 发生在中国! 经济发展面临着能源供应和环境保护的双重巨大压力。

目前,为了人类社会的可持续发展,世界能源发展已进入新一轮战略调整期,发达国家和新兴国家纷纷制定能源发展战略。战略重点在于:提高化石能源开采和利用率;大力开发可再生能源;最大限度地减少有害物质和温室气体排放,从而实现能源生产和消费的高效、低碳、清洁发展。对高速发展中的我国而言,能源问题的求解直接关系到现代化建设进程,能源已成为中国可持续发展的关键! 因此,我们更有必要以加快转变能源发展方式为主线,以增强自主创新能力为着力点,规划能源新技术的研发和应用。

在国家重视和政策激励之下,我国能源领域的新概念、新技术、新成果不断涌现;上海交通大学出版社出版的江泽民学长著作《中国能源问题研究》(2008 年)更是从战略的高度为我国指出了能源可持续的健康发展之路。为了“对接国家能源可持续发展战略,构建适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台”,我们策划、组织编写了这套“能源与环境出版工程”丛书,其目的在于:

一是系统总结几十年来机械动力中能源利用和环境保护的新技术新成果；

二是引进、翻译一些关于“能源与环境”研究领域前沿的书籍，为我国能源与环境领域的技术攻关提供智力参考；

三是优化能源与环境专业教材，为高水平技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书或教学参考书，满足人才培养对教材的迫切需求；

四是构建一个适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台。

该学术丛书以能源和环境的关系为主线，重点围绕机械过程中的能源转换和利用过程以及这些过程中产生的环境污染治理问题，主要涵盖能源与动力、生物质能、燃料电池、太阳能、风能、智能电网、能源材料、大气污染与气候变化等专业方向，汇集能源与环境领域的关键性技术和成果，注重理论与实践的结合，注重经典性与前瞻性的结合。图书分为译著、专著、教材和工具书等几个模块，其内容包括能源与环境领域内专家们最先进的理论方法和技术成果，也包括能源与环境工程一线的理论 and 实践。如钟芳源等撰写的《燃气轮机设计》是经典性与前瞻性相统一的工程力作；黄震等撰写的《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》和王如竹等撰写的《绿色建筑能源系统》是依托国家重大科研项目的新成果新技术。

为确保这套“能源与环境”丛书具有高品质和重大的社会价值，出版社邀请了杜祥琬院士、黄震教授、王如竹教授等专家，组建了学术指导委员会和编委会，并召开了多次编撰研讨会，商谈丛书框架，精选书目，落实作者。

该学术丛书在策划之初，就受到了国际科技出版集团 Springer 和国际学术出版集团 John Wiley & Sons 的关注，与我们签订了合作出版框架协议。经过严格的同行评审，Springer 首批购买了《低铂燃料电池技术》(*Low Platinum Fuel Cell Technologies*)，《生物质水热氧化法生产高附加值化工产品》(*Hydrothermal Conversion of Biomass into Chemicals*)和《燃煤烟气汞排放控制》(*Coal Fired Flue Gas Mercury Emission Controls*)三本书的英文版权，John Wiley & Sons 购买了《除湿剂超声波再生技术》(*Ultrasonic Technology for Desiccant Regeneration*)的英文版权。这些著作的成功输出体现了图书较高的学术水平和良好的品质。

希望这套书的出版能够有益于能源与环境领域里人才的培养,有益于能源与环境领域的技术创新,为我国能源与环境的科研成果提供一个展示的平台,引领国内外前沿学术交流和创新并推动平台的国际化发展!

翁史烈

2013年8月

前 言

随着汽车越来越多地走入普通家庭,我国汽车的产销量高速增长,2009年我国汽车销量首次超过美国,达到1 364万辆;2011年11月我国汽车保有量首次突破1亿辆;2012年我国汽车产销量双双突破1 900万辆;2013年我国汽车销量再创新高,达到2 198万辆,产量达到了2 211万辆。我国汽车产销量已连续五年居世界首位。汽车在给工作和生活带来便捷的同时,也带来了严峻的能源与环境问题。汽车是我国大气污染的主要贡献者,是造成灰霾、光化学烟雾污染的重要原因。

作为大气环境中颗粒物的主要污染源,汽车排气颗粒物粒径细小,在环境空气中持续的时间长,具有很强的吸附能力,表面吸附着有机碳和多种致癌物质,可以渗透到人体支气管和肺泡内,甚至可以穿透人体肺泡进入血液,引起哮喘、肺癌和心血管机能障碍等疾病,对人类危害很大。汽车排出的细颗粒亦是造成能见度下降的主要原因,大气中的细颗粒物对光的散射和吸收能够发生显著的消光作用,大幅降低了有效视距。机动车颗粒物污染防治的紧迫性日益凸显。

本书是作者及其研究团队近年来在机动车排气颗粒物及其对大气环境污染研究方面成果的总结与结晶。本书围绕机动车颗粒物排放污染,包括颗粒物“源排放”、颗粒物由“排气管”到“道路”和“道路”到“环境”三阶段变化特征分析,主要内容包括机动车颗粒物污染特征,欧美和中国机动车排放法规,机动车颗粒物排放的测试与分析方法,稀释过程对机动车排气颗粒物的影响,压燃式发动机颗粒物排放的主要成分与粒径分布特征,压燃式发动机颗粒物排放形貌、内部结构及其氧化性,机动车颗粒物道路排放特征及其对环境的影响,高速公路环境大气颗粒物理化特性及其来源解析等。

本书内容还包含了刘炜、许朕和管斌等的博士论文工作和相关研究工

作,以及作者研究团队在人才培养与科学研究方面的相关研究成果。在此特别感谢国家自然科学基金委员会和上海交通大学对本书科研工作的大力支持。感谢香港理工大学张镇顺教授对本书研究工作的贡献。感谢上海科技专著出版资金的资助,感谢上海交通大学出版社热情、细致的编辑工作。

鉴于机动车颗粒物排放与城市大气污染的研究是一个新兴的前沿研究领域,国内外尚缺乏相关学术著作。希望本书的出版有助于我国灰霾和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染治理,有益于能源与环境保护专业人才培养。

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。

黄 震

目 录

第1章 绪论	001
1.1 机动车颗粒物排放对环境和健康的影响	001
1.2 机动车颗粒物排放污染三阶段变化特征	003
1.2.1 机动车颗粒物“源排放”特征	005
1.2.2 机动车颗粒物从“排气管”到“道路”阶段的污染特征	009
1.2.3 机动车颗粒物从“道路”到“环境”阶段的污染特征	010
1.3 欧美和中国的机动车排放法规	014
1.3.1 轻型车排放法规	014
1.3.2 重型车排放法规	021
参考文献	024
第2章 机动车颗粒物排放的测试与分析方法	031
2.1 机动车颗粒物排放的采样方法及系统	031
2.1.1 通道型稀释取样系统设计	032
2.1.2 喷射型稀释系统	036
2.2 机动车排气颗粒物的分析原理与方法	038
2.2.1 排气颗粒物的质量浓度及其粒径分布分析	038
2.2.2 排气颗粒物的数量浓度及其粒径分布分析	039
2.2.3 排气颗粒物的热重分析	040
2.2.4 排气颗粒物的挥发性分析	043
2.2.5 排气颗粒物的形貌结构分析	044
2.2.6 排气颗粒物的主要化学组分分析	047
2.3 本章小结	050
参考文献	050
第3章 稀释过程对机动车排气挥发性纳米颗粒物的影响	053
3.1 稀释通道内排气稀释过程中挥发性纳米颗粒物形成和变化理论	053

3.1.1	成核作用	053
3.1.2	凝并作用	059
3.1.3	凝结和挥发作用	060
3.1.4	沉降作用	060
3.2	稀释通道内排气稀释过程中挥发性纳米颗粒物形成和变化模拟 ...	061
3.2.1	参数设定	061
3.2.2	成核作用	062
3.2.3	凝并作用	063
3.2.4	凝结和挥发作用	065
3.2.5	沉降作用	068
3.3	排气稀释过程中挥发性纳米颗粒物形成和变化测试	069
3.3.1	初级通道混合气温度对挥发性纳米颗粒物数浓度和粒径分布的影响	070
3.3.2	初级通道混合气湿度对挥发性纳米颗粒物数浓度和粒径分布的影响	071
3.3.3	混合气在初级通道内停留时间对挥发性纳米颗粒物数浓度和粒径分布的影响	072
3.3.4	初级通道稀释比对挥发性纳米颗粒物数浓度和粒径分布的影响	072
3.4	本章小结	074
	参考文献	075
 第4章 压燃式发动机排放颗粒物主要成分		077
4.1	颗粒物质量排放及其挥发性特征	077
4.1.1	颗粒物质量排放及其尺寸分布特征	077
4.1.2	基于质量测量的颗粒物挥发性	080
4.2	颗粒物数量排放及其挥发性特征	082
4.2.1	基于数量测量的颗粒物挥发性	082
4.2.2	颗粒物数量排放及其挥发性的粒径分布特征	086
4.3	排气颗粒中的碳成分	088
4.3.1	PM _{1.8} 及PM _{0.18} 质量排放及其碳成分	088
4.3.2	OC及EC的粒径分布特征	090
4.4	排气颗粒中的PAHs成分	092
4.4.1	PM _{1.8} 和PM _{0.18} 中PAHs比排放率	092
4.4.2	颗粒物中PAHs的粒径分布特征	095
4.4.3	基于BaP _{eq} 的毒理性评价	098

4.5 本章小结	099
参考文献	100
第5章 压燃式发动机颗粒物形貌结构及其氧化特性	105
5.1 发动机工况对颗粒物形貌结构及其氧化特性的影响	105
5.1.1 燃烧特性	105
5.1.2 颗粒物质量与数量浓度	107
5.1.3 基本颗粒尺寸	108
5.1.4 颗粒物纳米结构	113
5.1.5 颗粒物氧化性	114
5.2 燃油特性对颗粒物形貌结构及其氧化特性的影响	116
5.2.1 燃烧特性	116
5.2.2 基本颗粒尺寸	117
5.2.3 颗粒物纳米结构	118
5.2.4 颗粒物氧化性	120
5.3 废气再循环对颗粒物纳米结构和氧化特性的影响	122
5.3.1 颗粒物纳米结构	124
5.3.2 颗粒物氧化性	128
5.4 颗粒物形貌结构及其氧化特性的粒径分布特征	130
5.4.1 颗粒物形态	130
5.4.2 基本颗粒尺寸	134
5.4.3 颗粒物纳米结构	134
5.4.4 颗粒物氧化性	137
5.5 本章小结	139
参考文献	140
第6章 机动车颗粒物道路排放特征及其对环境的影响	145
6.1 道路环境机动车颗粒物排放特征	145
6.1.1 实验设备及方法	145
6.1.2 总颗粒浓度时间分布特征	149
6.1.3 超细颗粒粒径分布特征	151
6.1.4 PM_{10} 和 CO 时间分布	153
6.2 高速公路下风向超细颗粒数浓度粒径分布特征	156
6.2.1 实验方法和条件	156
6.2.2 风向、风速对超细颗粒数浓度分布的影响	158

6.2.3	颗粒数浓度粒径分布特性	159
6.2.4	CO、PM ₁ 和总颗粒数浓度横向分布	160
6.3	街道峡谷内超细颗粒数浓度粒径分布垂直变化特征	162
6.3.1	实验方法和条件	162
6.3.2	颗粒数浓度粒径分布特性	164
6.3.3	CO、PM _{2.5} 、总颗粒数、总颗粒表面积和总颗粒体积浓度的垂直分布 ...	166
6.3.4	颗粒数浓度粒径分布垂直变化影响因素分析	168
6.4	本章小结	169
	参考文献	170
第7章	高速公路环境大气颗粒物理化特性及其来源解析	173
7.1	颗粒物采集及分析方法	173
7.2	颗粒物形貌特征及其金属成分	174
7.3	颗粒物质量浓度及其尺寸分布特征	176
7.4	颗粒物中 OC、EC 浓度及其尺寸分布特征	177
7.5	颗粒物中水溶性无机离子的浓度及其尺寸分布特征	180
7.5.1	硫酸盐	180
7.5.2	硝酸盐	181
7.5.3	铵盐	181
7.5.4	氯离子和钠离子	182
7.5.5	钾离子、镁离子和钙离子	183
7.6	颗粒物中 PAHs 浓度及其尺寸分布特征	183
7.7	高速公路边大气颗粒物源解析	187
7.7.1	基于颗粒物主要成分的源解析	187
7.7.2	基于 PAHs 的源解析	191
7.8	机动车颗粒物排放因子	193
7.9	本章小结	194
	参考文献	196
附录	部分彩图	199
索引		205

第 1 章 绪 论

1.1 机动车颗粒物排放对环境和健康的影响

随着我国国民经济的持续快速发展,能源消费的不断攀升,发达国家历经近百年出现的环境问题在我国近二三十年集中出现,尤其是近年来,我国多个地区连续的灰霾天气开始受到民众的广泛关注。中国气象局最新发布的《霾的观测与预报等级》中将灰霾定义为:大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中,使水平能见度小于 10 km 的空气普遍有混浊现象,使远处光亮物微带黄、红色,使黑暗物微带蓝色,因此霾也被称作“灰霾”。霾和雾具有比较相似的视觉特征,两者的本质区别在于雾主要成分为水气,而霾则主要是由空气中大量悬浮颗粒形成的,后者对公众具有更大的危害。 $\text{PM}_{2.5}$ 作为造成灰霾天气的“元凶”之一,引起了社会广泛的关注。国家环保部于 2012 年发布的《环境空气质量标准》中已明确将 $\text{PM}_{2.5}$ 纳入我国的空气质量监测体系,并将于 2016 年在全国范围内执行^[1]。2013 年,通过对京津冀、长三角和珠三角等区域内地级及以上城市的空气质量进行评估发现,除舟山外,其余各城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均排放浓度无一达标^[2],因此加强对 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染防治工作已经成为我国环境保护领域的重要任务。

所谓 $\text{PM}_{2.5}$,是指悬浮在空气中的直径小于 $2.5\mu\text{m}$ 的细小颗粒物。由于这些颗粒物质量轻,很难自然沉降到地面上,长期在空中漂浮,进而与空气中的水气结合,严重降低大气能见度。研究表明, $\text{PM}_{2.5}$ 主要来自人类的各类大气污染源,包括机动车尾气,工业和电厂锅炉,工业工艺过程,扬尘、餐饮、秸秆燃烧等。随着机动车保有量的迅猛增长,道路交通源污染物排放在大气污染中所占比例不断上升。机动车颗粒物排放已被公认为是城市大气环境中 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源之一。以 2011 年为例,北京市的 $\text{PM}_{2.5}$ 中来自机动车排放的比例达到 22%,高于燃煤等其他污染来源^[3],而在上海和广州,机动车排放占城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的比例也分别达到 $\frac{1}{4}$ 左右^[4, 5]。

机动车作为流动源,污染物排放较分散,且排放主要集中在城市主要道路两侧和交通密集区域,与行人的距离很近,同样的排放量,行人对机动车排放污染物的摄入

量远高于对电厂等工业排放源污染物的摄入量,机动车颗粒物排放相对其他颗粒物排放源对人体健康有着更严重的危害。因此对机动车的颗粒物排放进行有效控制是实现城市空气质量改善之关键。

大量的研究表明,PM_{2.5}浓度的增加对气候变化、城市大气能见度和人体健康均有着明显的负面作用。大气颗粒物可以通过散射和吸收太阳辐射与地面长波辐射改变地气系统的辐射平衡从而直接影响气候,也可以作为云凝结核通过改变云的宏、微观特性,特别是改变云的生命期和光学特性来间接影响气候^[6]。城市能见度降低与大气中细颗粒 PM_{2.5} 的浓度有着显著的相关性^[7-10]。研究人员对澳大利亚布里斯班大气消光系数和 PM_{2.5} 的化学成分的关系进行回归分析^[8],发现该地区消光系数和 PM_{2.5} 质量浓度相关,特别是与 PM_{2.5} 中的煤烟、硫酸盐和非土壤钾的质量有关。研究还发现,PM_{2.5} 是导致韩国首尔地区能见度下降的主要因素^[9],该地区灰霾天气时 PM_{2.5} 的浓度是晴朗天气时的 2~4 倍。

除影响气候变化和大气能见度外,大气 PM_{2.5} 更与居民的健康息息相关^[11-17]。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)发布的报告显示,无论是发达国家还是发展中国家,目前绝大多数的城市和农村人口均遭受到颗粒物对人体健康的影响。WHO 在 2005 年出版的《空气质量准则》中就已经指出,当 PM_{2.5} 年均浓度达到 35 μg/m³ 时,人的死亡风险比 10 μg/m³ 时增加了近 15%^[18]。美国癌症协会(ACS)对美国各大城市 50 万成人暴露于不同水平大气污染后的生存状况进行了分析^[11],发现大气 PM₁₀ 每增加 100 μg/m³,人群总死亡发生的危险就增加 4.0%。国内外有关 PM_{2.5} 和人的死亡关系的流行病理学资料调查分析结果表明,大气中 PM_{2.5} 浓度每提高 100 μg/m³,居民死亡发生率增加就超过 12%^[19]。颗粒物对人体的危害具有明显的粒径特征,图 1-1 为不同粒径吸入颗粒在人体内的吸入特性,由图可见,颗粒在人体呼吸系统的沉积作用包括扩散沉积和碰撞沉积两种

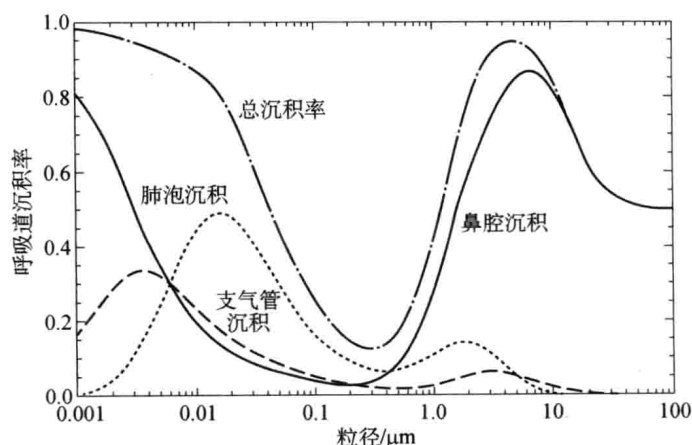


图 1-1 不同粒径的吸入颗粒在人体内呼吸系统的沉积^[14]

机理,粒径在 $2.5\mu\text{m}$ 以上的大颗粒物主要发生碰撞沉积作用,粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的颗粒主要发生扩散沉积作用。吸入颗粒经过鼻腔进入支气管前阶段通常同时存在扩散沉积和碰撞沉积两种沉积作用,粒径在 $2.5\mu\text{m}$ 以上的颗粒主要通过碰撞沉积作用在鼻腔内被吸收掉,一定量极细的颗粒,如 $0.01\mu\text{m}$ 以下也会在扩散沉积作用下在鼻腔内被吸收掉,而大量粒径在 $0.1\mu\text{m}$ 以下的细颗粒物会通过扩散沉积作用进入支气管和肺泡中,这表明大部分 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒能够深入人体肺部,对人体健康造成危害。细颗粒相对大颗粒具有较大的比表面积,通常能富集众多有毒痕量元素(如 As, Se, Pb, Cr 等)和有机物(如多环芳烃 PAHs、二噁英)等污染物,这些污染物多为致癌物质,与肺癌的发病率直接相关^[20]。 $\text{PM}_{2.5}$ 会引发包括咳嗽、呼吸困难、哮喘、慢性支气管炎等呼吸系统的疾病,并导致心律失常、心脏病等心血管方面的疾病^[21-29]。

由机动车排放产生的颗粒粒径大多处于 $20\sim 500\text{nm}$ 的区间内^[30],属于超细颗粒的范畴,具有极强的穿透能力,能沉积至肺部深处,同时其巨大的比表面积为毒性物质的吸附提供了有效场所,因而能够将更多致癌、致突变物质带入人体内。机动车颗粒物进入人体呼吸系统后或经由表面吸附的活性基团自行释放,或通过与各类细胞的相互作用产生大量活性氧簇,使细胞内的氧化平衡被破坏,导致氧化应激显著增加,最终引发细胞炎症反应甚至基因损害^[31]。近年来的研究表明,柴油机颗粒物能引起肺部功能减弱、过敏性哮喘和肺炎等急慢性呼吸道疾病,并存在诱发肺癌的可能^[32-36]。WHO 通过调查发现长期暴露在柴油机尾气的人群患肺癌的概率比普通人高 $20\%\sim 40\%$ ^[18]。2012 年 6 月,WHO 将柴油废气确定为致癌物,并将柴油废气的致癌危害等级提升至最高级。因此有必要对柴油机和汽油机颗粒物的生成机理进行深入研究,掌握影响其理化特性的主要因素,从而为寻求有效降低机动车颗粒物排放的策略与方法提供技术支撑和理论指导。

1.2 机动车颗粒物排放污染三阶段变化特征

机动车颗粒物排放污染,即从颗粒物在发动机缸内燃烧生成到最终形成大气 $\text{PM}_{2.5}$,主要包括颗粒物“源排放”、颗粒物由“排气管”到“道路”和“道路”到“环境”三个阶段。颗粒物的“源排放”主要受机动车燃料和发动机燃烧条件等因素影响;“排气管”到“道路”阶段,颗粒数浓度粒径分布主要受稀释作用影响,同时还受到成核、凝结和凝并等动力学作用影响;“道路”到“环境”的变化过程,主要受车况、路况以及气象条件的影响。

图 1-2(彩图见附录)揭示了发动机缸内燃料燃烧到大气 $\text{PM}_{2.5}$ 形成整个变化过程。具体步骤为:高温缺氧条件下,燃料在燃烧室内燃烧形成大量的碳粒,碳粒在发动机排气行程部分被氧化^[37],没有被氧化的碳粒发生凝并作用形成大的碳粒