



“十三五”国家重点出版物出版规划项目
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21世纪高等教育建筑环境与能源应用工程系列规划教材

第2版

通风工程

王汉青 主编

非
外
借



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



双色印刷



免费教学资源

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21 世纪高等教育建筑环境与能源应用工程系列规划教材

通风工程

第 2 版

主 编	王汉青			
副主编	姬长发	李向阳		
参 编	刘荣华	王洪义	李 华	付峥嵘
主 审	汤广发			



机械工业出版社

本书继承了第1版的优点,在第1版基础上,结合国家相关新标准、新规范和通风工程领域的新发展以及教学的新需求,与时俱进,对相关内容进行了修订。

书中介绍了工业有害物种类及其来源和危害,系统讲述了消除工业和民用建筑空气中所含有害物的各种通风方法,内容包括自然通风、全面通风、局部通风、隧道通风、防烟排烟通风、空气净化原理与设备、通风管道设计计算、测量调试等。新增了室外空气污染物包括雾霾的形成、扩散、危害及通风防治方法,多元通风的相关内容,通风工程气流流动的数值模拟方法等。

本书注重基本概念、基本原理、基本方法,同时注重对学生工程设计基本技能的培养,内容全面、翔实,反映了通风工程领域最新的技术和研究成果。各章之间联系紧密,但又相对独立,便于教师的讲解和学生自学。

本书可作为高校建筑环境与能源应用工程、采矿工程和安全工程等专业的本科生教学用书,也可供暖通风空调领域工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

通风工程/王汉青主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2018.3
21世纪高等教育建筑环境与能源应用工程系列规划教材 “十三五”国家重点出版物出版规划项目 普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-58857-3

I. ①通… II. ①王… III. ①房屋建筑设备-通风设备-建筑安装-高等学校-教材 IV. ①TU834

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第041504号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘涛 责任编辑:刘涛 臧程程

责任校对:张征 封面设计:路恩中

责任印制:孙炜

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2018年5月第2版第1次印刷

184mm×260mm·22.5印张·588千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58857-3

定价:59.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

序

建筑环境与设备工程（2012年更名为建筑环境与能源应用工程）专业是教育部在1998年颁布的全国普通高等学校本科专业目录中将原“供热通风与空调工程”专业和“城市燃气供应”专业进行调整、拓宽而组建的新专业。专业的调整不是简单的名称的变化，而是学科科研与技术发展，以及随着经济的发展和人民生活水平的提高，赋予了这个专业新的内涵和新的元素，创造健康、舒适、安全、方便的人居环境是21世纪本专业的重要任务。同时，节约能源、保护环境是这个专业及相关产业可持续发展的基本条件。它们和建筑环境与设备工程（建筑环境与能源应用工程）专业的学科科研与技术发展总是密切相关，不可忽视。

新专业的组建及其内涵的定位，首先是由社会需求决定的，也是和社会经济状况及科学技术的发展水平相关的。我国的经济持续高速发展和大规模建设需要大批高素质的本专业人才，专业的发展和重新定位必然导致培养目标的调整和整个课程体系的改革。培养“厚基础、宽口径、富有创新能力”，符合注册公用设备工程师执业资格要求，并能与国际接轨的多规格的专业人才是本专业教学改革的目的。

机械工业出版社本着为教学服务，为国家建设事业培养专业技术人才，特别是为培养工程应用型和技术管理型人才做贡献的愿望，积极探索本专业调整和过渡期的教材建设，组织有关院校具有丰富教学经验的教师编写了这套建筑环境与设备工程（建筑环境与能源应用工程）专业系列教材。

这套系列教材的编写以“概念准确、基础扎实、突出应用、淡化过程”为基本原则，突出特点是既照顾学科体系的完整，保证学生有坚实的数理科学基础，又重视工程教育，加强工程实践的训练环节，培养学生正确判断和解决工程实际问题的能力，同时注重加强学生综合能力和素质的培养，以满足21世纪我国建设事业对专业人才的要求。

我深信，这套系列教材的出版，将对我国建筑环境与设备工程（建筑环境与能源应用工程）专业人才的培养产生积极的作用，会为我国建设事业做出一定的贡献。

陈在康

第2版前言

普通高等教育“十一五”国家级规划教材《通风工程》第1版自2007年出版以来,受到了全国相关高等学校的普遍欢迎,截至修订前已印刷10余次,发行近5万册。该教材不但已成为国内不少普通高等学校“通风工程”课程的主选教材,同时也成为许多工程运营人员和设计院所工程师的参考工具书。许多读者来信来函对本书表示积极肯定,也有些读者提出了一些宝贵的意见。近十年来,随着暖通空调领域不断发展,特别是为了应对大气污染和室内外空气环境保护的要求,通风工程领域新产品、新材料和新技术取得了许多新的进展,使得相关规范、标准做了比较多的更新。为了适应这些新形势和新情况,我们对本书进行了修订。

第2版入选“十三五”国家重点出版物出版规划项目。

第2版继承了第1版的优点,聚焦于应用型本科人才的培养,在继续强化基本概念、基本原理和基本方法的同时,重点关注通风工程领域一些新的趋势,诸如相关规范修编,以及雾霾对通风的要求和应用日益广泛的计算流体力学分析方法(Computational Fluid Dynamics, CFD)等。主要修改内容如下:

1. 纠正了一些编写和印刷错误,并根据近几年相关规范的修订情况,对全书相关规范涉及的内容进行了全面修改。

2. 在第1章、第3章增加了室外空气污染物包括雾霾的形成、扩散、危害及通风防治方法的内容。

3. 在第3章增加了多元通风的相关内容,对多元通风、太阳能烟囱等的概念进行了介绍。

4. 在第4章的修改中,出于开拓学生思维的考虑,增加了用于计算吹吸式排风罩的流量比法的概念。

5. 第5章对隧道通风,第6章对粉尘性质、除尘器类型和除尘器选择,第8章对风机的选择计算等内容进行了补充和完善。

6. 针对目前CFD作为一个基本分析工具在通风工程领域应用日益广泛的情况,根据编者长期对CFD在暖通空调领域方面应用的研究,增加了第10章“通风工程气流流动的数值模拟方法”,由王汉青编写,该章简要介绍了其基本原理,并用自然通风、三维非定常室内自然对流、机械通风(单、双侧排风罩)、旋风除尘器等典型案例算例,对CFD在暖通空调中的应用进行了介绍。本章可以作为扩充学生知识面的选讲内容或自学内容,也可以作为学生自主学习的课外项目。

第2版由主编王汉青具体制定修订意见,并征求编者意见后统一完成。博士研究生朱辉、李钺俊,硕士研究生周振宇、李坤相和汪婷婷做了许多资料收集工作,在此表示感谢!由于编者知识和经验有限,难免会有差错,诚请各位读者予以指正。

编者

第1版前言

《通风工程》是普通高等学校建筑环境与设备工程专业主干课程教材之一,本教材可以作为建筑环境与设备工程和采矿工程两个专业的本科生教学用书,按50~60课时编写。

本教材被教育部评为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。

本教材介绍了工业有害物种类及其来源和危害,系统讲述了消除工业和民用建筑空气中所含有害物的各种通风方法,内容包括全面通风、局部通风、隧道通风、防排烟通风、空气净化原理与设备、通风管道设计计算、测量调试等。本教材注重基本概念、基本原理、基本方法,同时注重对学生工程设计基本技能的培养,内容全面、翔实,各章之间联系紧密但又相对独立,便于教师在讲解中取舍和学生自学。

与一般通风教材相比,本教材在强化基础知识的同时,试图在加强实践能力培养、反映最新科技成果上做些工作。具体体现在以下几个方面:

(1)“置换通风”和“防排烟通风”是近年来发展起来的新兴通风方式,为了适应工程应用的需要,本教材介绍了其基本原理和设计要点。

(2)“自然通风”一章中,为适应建筑节能和以人为本设计理念的要求,增加了对生态建筑通风方式的介绍。

(3)“隧道通风”在工业和民用建筑中使用越来越多,本教材增加了这部分内容,既可满足采矿工程专业的教学要求,又可扩充本专业学生的知识面。

(4)近年来,在民用建筑通风空调工程中,出现了诸如非平衡等离子、光催化、负离子和臭氧净化等新概念,本书在净化原理与设备一章中做了介绍。

(5)在“测量与调试”一章中,增加了有害气体的测量内容,教学中可根据实际需要予以删减。

全书共分九章,由湖南工业大学王汉青教授拟定全书内容和编写提纲并编写第8章、与姬长发合作编写第1章、与李向阳合作编写第7章,湖南工程学院李小华(第2章),湖南工业大学付峥嵘(第3章),湖南科技大学刘荣华(第4章),西安科技大学姬长发(第5章),南华大学李向阳(第6章),平顶山工学院(现为河南城建学院)王洪义(第9章)参加了本书的编写。全书由王汉青教授统稿。

本教材由博士生导师王汉青教授主编,姬长发教授、李向阳副教授任副主编,湖南大学博士生导师陈在康、汤广发教授主审。

本教材引用了许多资料(数据、图表、例题等),谨向有关文献的作者表示衷心感谢,湖南工业大学王智勇老师在本教材编写中做了不少工作,在此一并表示衷心感谢。

由于编者的水平有限,书中错误和不足之处,敬请专家和读者批评指正,编者不胜感谢。

编者

目 录

序	
第2版前言	
第1版前言	
第1章 概述	1
1.1 工业有害物及其卫生毒理学基础	1
1.1.1 工业有害物的种类与来源	1
1.1.2 工业有害物卫生毒理学基础	3
1.1.3 工业有害物对工农业生产的影响	8
1.1.4 工业有害物对大气环境的影响	8
1.2 气象条件对人体生理的影响	9
1.2.1 人体与周围环境的热交换	9
1.2.2 影响人体热舒适的基本参数	10
1.3 空气中有害物含量与有关标准	11
1.3.1 有害物含量	11
1.3.2 卫生标准	11
1.3.3 排放标准	12
1.4 防治有害物的通风方法	13
1.4.1 有害物在室内的传播机理	13
1.4.2 防治有害物的通风方法	14
1.4.3 防治有害物的综合措施	15
习题	16
参考文献	16
第2章 全面通风	17
2.1 全面通风换气量的确定	17
2.1.1 全面通风换气的基本微分 方程式	17
2.1.2 全面通风量的确定	19
2.1.3 有害物散发量的计算	21
2.1.4 气流组织	21
2.1.5 空气平衡和热平衡	23
2.2 置换通风	26
2.2.1 评价通风效果的指标	26
2.2.2 置换通风的原理	28
2.2.3 置换通风的特性	28
2.2.4 置换通风的设计	29
2.3 事故通风	33
习题	33
参考文献	34
第3章 自然通风	35
3.1 自然通风作用原理	35
3.1.1 热压作用下的自然通风	36
3.1.2 风压作用下的自然通风	38
3.1.3 热压与风压联合作用下的自然 通风	39
3.2 工业厂房自然通风的计算	40
3.2.1 设计性计算的步骤	40
3.2.2 校核性计算的步骤	43
3.2.3 计算实例	44
3.3 自然通风与建筑设计	46
3.3.1 建筑总平面规划	46
3.3.2 建筑形式的选择	47
3.3.3 工艺布置	48
3.3.4 避风天窗及风帽的设计	49
3.3.5 生态建筑的自然通风	50
3.4 多元通风	53
3.4.1 多元通风技术的提出	54
3.4.2 太阳能烟囱	54
3.4.3 自然通风模式和机械通风模式交替 运行	54
3.4.4 风机辅助式自然通风	54
3.4.5 热压和风压辅助式机械通风	55
3.5 室外空气污染物的形成及建筑通风 防治方法	55
3.5.1 室外空气污染物的主要成分及其 危害	55
3.5.2 室外空气污染物的主要来源	57
3.5.3 室外空气污染物的扩散规律 分析	57
3.5.4 室外空气污染物的通风防治 方法	58
习题	60

参考文献	60	5.2.1 自然通风	93
第4章 局部通风	62	5.2.2 机械通风	96
4.1 概述	62	5.3 施工隧道通风	96
4.1.1 局部排风	62	5.3.1 施工通风控制条件	96
4.1.2 局部送风	63	5.3.2 施工通风方式的选择	97
4.2 局部排风的设计原则	63	5.3.3 施工工作面通风量计算	101
4.2.1 局部排风系统划分的原则	63	5.3.4 施工通风管理与设备的配置	102
4.2.2 局部排风罩的形式及设计原则	63	5.4 营运隧道的通风	102
4.2.3 局部排风的净化处理	64	5.4.1 通风要求	103
4.3 排风罩设计计算理论	64	5.4.2 通风量和风压	104
4.3.1 排风罩口的气流运动规律	64	5.4.3 通风方式的选择	105
4.3.2 排风罩排风量计算方法	68	习题	108
4.4 密闭罩	69	参考文献	108
4.4.1 工作原理	69	第6章 空气净化原理与设备	109
4.4.2 密闭罩的基本形式	69	6.1 概述	109
4.4.3 影响密闭罩性能的因素	70	6.1.1 净化装置的性能	109
4.4.4 密闭罩计算	71	6.1.2 净化装置的分类	112
4.4.5 密闭罩的应用及设计	72	6.1.3 净化装置的选择	113
4.5 柜式排风罩	72	6.2 粉尘的净化	113
4.5.1 柜式排风罩的形式	72	6.2.1 粉尘的特性、除尘机理	113
4.5.2 柜式排风罩排风量的计算	73	6.2.2 重力沉降室、惯性除尘器	116
4.5.3 柜式排风罩设计的注意事项	74	6.2.3 旋风除尘器	120
4.6 外部吸气罩	74	6.2.4 湿式除尘器	127
4.6.1 外部吸气罩排风量的计算	74	6.2.5 过滤式除尘器	130
4.6.2 外部吸气罩设计应注意的事项	77	6.2.6 电除尘器	138
4.7 热源上部接受式排风罩	78	6.2.7 除尘器的选择	150
4.7.1 热射流及其计算	78	6.3 有害气体的净化	153
4.7.2 热源上部接受罩排风量的计算	79	6.3.1 概述	153
4.8 槽边排风罩	81	6.3.2 吸收与吸附原理	154
4.8.1 槽边排风罩的结构形式	81	6.3.3 吸收与吸附装置	163
4.8.2 槽边排风罩排风量的计算	82	6.4 净化新方法	166
4.9 吹吸式排风罩	84	6.4.1 非平衡等离子体空气净化	166
4.9.1 吹吸式排风罩的结构形式	84	6.4.2 光催化净化方法	168
4.9.2 吹吸式排风罩的设计计算	84	6.4.3 负离子净化方法	169
4.10 排风罩的其他形式	86	6.4.4 臭氧净化方法	172
4.10.1 屋顶集气罩	86	习题	173
4.10.2 气幕式排风罩	87	参考文献	175
4.11 局部送风	88	第7章 防烟排烟通风	177
习题	91	7.1 概述	177
参考文献	92	7.1.1 作用与功能	177
第5章 隧道通风	93	7.1.2 防排烟系统适用范围	178
5.1 概述	93	7.1.3 防火和防烟分区	179
5.2 常用的隧道通风方法	93	7.1.4 安全疏散	179

7.1.5 建筑物烟气流动特性	180	习题	245
7.1.6 防排烟设计程序	182	参考文献	247
7.2 防烟通风设计	183	第9章 通风系统的测量与调试	248
7.2.1 机械防烟加压送风系统的风量	183	9.1 通风系统风压、风速、风量的测定	248
7.2.2 加压送风防烟系统设计	184	9.1.1 测定断面和测点的确定	248
7.3 排烟通风设计	186	9.1.2 管内压力的测量	250
7.3.1 机械排烟系统的组成	186	9.1.3 管内流速的计算	251
7.3.2 排烟系统的设计	188	9.1.4 管内流量的计算	252
7.3.3 高层建筑地下汽车库的机械排烟 设计	191	9.1.5 集气口测量法	252
7.4 防排烟系统设施与控制	194	9.1.6 用于含尘气流的测压管	253
7.4.1 防排烟设施	194	9.2 含尘浓度测定	254
7.4.2 防排烟电气控制	199	9.2.1 粉尘主要物理性质的测定	255
7.5 人防地下室通风设计	201	9.2.2 空气中粉尘浓度的测定	264
7.5.1 概述	201	9.2.3 高温烟气含尘浓度的测定	271
7.5.2 防护通风设计要点	201	9.3 气体含量测定	275
7.5.3 防护通风的进风系统设置	202	9.3.1 二氧化硫的测定	275
7.5.4 防护通风排风系统设置	203	9.3.2 氮氧化物(NO_x)的测定	280
习题	206	9.3.3 一氧化碳的测定	283
参考文献	206	9.3.4 臭氧的测定	288
第8章 通风管道系统的设计计算	207	9.3.5 总烃及非甲烷烃的测定	289
8.1 风管内气体流动的流态和阻力	207	9.3.6 氟化物的测定	292
8.1.1 两种流态及其判别分析	207	9.4 净化系统性能测定	293
8.1.2 风管内空气流动的阻力	208	9.4.1 局部排风罩的性能测定	293
8.2 风管内的压力分布	214	9.4.2 除尘器的性能测定	294
8.2.1 动压、静压和全压	214	9.4.3 风机的性能测定	296
8.2.2 风管内空气压力的分布	214	9.5 矿井井下通风系统阻力的测定	297
8.3 通风管道的设计计算	217	9.5.1 风阻力 P_R 测算	297
8.3.1 风道设计的内容及原则	217	9.5.2 立井通风阻力测定	299
8.3.2 风道设计的方法	217	9.5.3 测定结果可靠性检查	300
8.3.3 风道设计的步骤	217	9.6 系统调试与运行	301
8.4 均匀送风管道设计计算	226	9.6.1 通风系统的调试	301
8.4.1 均匀送风管道的设计原理	227	9.6.2 通风系统的运行管理	302
8.4.2 均匀送风管道的计算	229	参考文献	302
8.5 通风管道设计中的常见问题及其处理 措施	232	第10章 通风工程气流流动的数值模拟 方法	303
8.5.1 系统划分	232	10.1 CFD数值模拟的基本原理	303
8.5.2 风管的布置、选型及保温与 防腐	233	10.1.1 数学模型	304
8.5.3 进排风口布置	235	10.1.2 偏微分方程组的离散方法	306
8.5.4 防爆及防火	235	10.1.3 常用仿真软件	307
8.6 气力输送系统的管道设计计算	236	10.2 自然通风的数值模拟	309
8.6.1 气力输送系统的分类和特点	237	10.2.1 计算对象描述	309
8.6.2 气力输送系统设计计算	238	10.2.2 边界条件	309
		10.2.3 计算结果分析	309

10.3 三维非定常室内自然对流	311
10.3.1 物理模型和边界条件	311
10.3.2 数值计算结果	312
10.4 机械通风的数值模拟	313
10.4.1 计算对象及其边界条件	314
10.4.2 计算过程及结果分析	314
10.5 旋风除尘器内部气流场数值模拟	321
10.5.1 旋风除尘器的计算模型	321
10.5.2 边界条件	321
10.5.3 结果分析	322
习题	324
参考文献	324

附录	325
附录 1 居住区大气中有害物质的最高容许浓度	325
附录 2 车间空气中有害物质的最高容许浓度	325
附录 3 镀槽边缘控制点的吸入速度 v_x	328
附录 4 通风管道单位长度摩擦阻力线算图	329
附录 5 部分常见管件的局部阻力系数	330
附录 6 通风管道统一规格	345
附录 7 各种粉尘的爆炸浓度下限	348
附录 8 气体和蒸气的爆炸极限	348

第1章

概 述

随着我国工业生产的快速发展,工业有害物的散发量日益增加,环境污染问题越来越严重。严重的环境污染和生态破坏给经济社会发展带来了负面影响。工业生产过程伴随着数以亿吨计的有害物排放,这些有害物如果不进行处理,会严重污染室内外空气环境,对人民身体健康造成极大危害。特别是工矿企业,工人长期接触、吸入 SiO_2 等粉尘后,肺部会引起弥漫性纤维化,到一定程度便形成“硅肺”。对一些特殊行业,如制药、航天、电子、建材等,如果没有相应的技术加以控制,粉尘在危害人体健康的同时,也严重影响企业产品质量,使生产无以为继。通风工程正是基于以上原因,针对居住建筑和生产车间的空气条件,一方面起着改善室内空气品质、保护人民健康、提高劳动生产率的重要作用;另一方面在许多工业部门起着保证生产正常进行,提高产品质量的作用。通风工程的主要任务是,控制生产过程中产生的粉尘、有害气体、高温、高湿,创造良好的生产环境和保护大气环境。

1.1 工业有害物及其卫生毒理学基础

1.1.1 工业有害物的种类与来源

工业生产中有许多伴随产品的加工过程而向环境散发出不同形态、不同性质的有害物质,如铸造、喷砂过程中飞扬的硅尘,纺织生产中散发的纤维尘,电镀生产中散发的酸、碱、铬雾,熔铜炉散发的氧化锌尘,化工生产中散发的溶剂气体以及热加工生产中散发的热、水蒸气等,均不同程度地对人体造成危害。因此,了解环境中存在的有害物质的形态、性质及其危害,对通风工程来说是十分重要的。

1. 工业有害物的种类

空气中有害物质的种类不同,其治理措施也大有差别。空气中有害物质的种类可归纳如下:

(1) 粉尘 粉尘是指分散于气体中的细小固体粒子,这些细小粒子通常是由煤、矿石和其他固体物料在运输、筛分、研磨、粉碎、加工等工艺过程中散发出来的,一般都具有与母料相同的物理、化学性质,但形态极不规则。其粒度范围相当广,粗大的可达 $200\mu\text{m}$,微细的小至 $0.25\mu\text{m}$ 以下(只能用超倍显微镜才能观察到)。其在空气中的数量及分布状况取决于它们的重力特性。

一种物质的微粒分散在另一种物质中组成一个分散系统,一般把固体或液体微粒分散在气体介质中所构成的分散系统称为气溶胶。按照微粒的来源及物理性质,气溶胶可细分为灰尘、烟、雾等种类。

1) 灰尘(dust)。灰尘是指所有固态分散性微粒。粒径在 $10\mu\text{m}$ 以上的较大微粒沉降速度快,经过一定时间后会沉降到地面或其他物体上,成为“降尘”或“落尘”;粒径在 $10\mu\text{m}$ 以下的会悬浮在空气中成为“浮尘”或“飘尘”,大气中飘尘大多粒径为 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 。飘尘容易随呼吸而进入呼吸道,粒径更小(如小于 $2.5\mu\text{m}$)的可通过呼吸道到达支气管和肺部,这对人体

的危害极为严重。因此，通风除尘除了捕集粒径较大的粉尘外，为了改善作业空气环境还应提高对 5μm 以下飘尘的捕集效率。

2) 烟 (smoke)。烟是指所有凝聚性固态微粒，以及液态粒子和固态粒子因凝聚作用而生成的微粒，通常是在燃烧、熔炼及熔化过程中受热挥发，直接升华为气态，然后冷凝所形成的。由于烟在形成过程中往往伴随着氧化反应，所以其成分与母料不同。烟的粒径一般在 0.01 ~ 1μm，在空气中沉降很慢，由于强烈的布朗运动，扩散能力很强。

3) 雾 (mist)。雾是指所有液态分散性微粒的液态凝聚性微粒，即悬浮在大气中微小液滴构成的气溶胶。雾是液体受机械力的作用分裂或蒸气在凝结核上凝结而成的。如化工生产过程中产生的酸、碱雾，镀铬过程产生的铬雾，喷漆过程飞溅的漆雾以及油雾等。雾的粒径一般在 0.1 ~ 10μm 之间；不论雾是如何形成的，其形状都是球形。

4) 烟雾 (smog)。烟雾是烟和雾的混合体。主要分两种：一种是伦敦烟雾，指大气中形成的自然雾与人为排出的烟气（煤粉尘、二氧化硫等）的混合体，对应于早期以燃煤为主要污染源的煤烟型污染；还有一种叫洛杉矶烟雾，是汽车和工厂排烟中的氮氧化物和碳氢化物经太阳紫外线照射而生成的二次污染物，亦称光化学烟雾，对应于近代燃油型污染。

5) 霾 (haze)。霾是悬浮在大气中的大量微小尘粒、烟粒或盐粒的集合体，是一种非水成物组成的气溶胶系统。霾一般呈乳白色，它使物体的颜色减弱，使远处光亮物体微带黄红色，而黑暗物体微带蓝色。其成分来源包括工业、农业生产和汽车尾气排放等，主要成分包含了空气中的灰尘、硫酸、硝酸、有机碳氢化合物等。根据我国气象局规定，如果水平能见度小于 10km 时，将这种非水成物组成的气溶胶系统造成的视程障碍称为霾 (haze) 或灰霾 (dust - haze)。

霾与雾的区别在于各自的形成条件。发生霾时相对湿度一般不大，而雾中的相对湿度是饱和的。一般来说相对湿度小于 80% 时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是由霾造成的，而相对湿度大于 90% 时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是由雾造成的，相对湿度介于 80% ~ 90% 之间时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾和雾的混合物共同造成的，但其主要成分是霾。霾与雾、云不一样，与晴空区之间没有明显的边界，霾粒子的分布比较均匀。雾与霾的区别见表 1-1。

表 1-1 雾与霾的区别

项目	雾	霾
相对湿度	100%	小于 80%
厚度	10 ~ 200m	1 ~ 3km
粒子尺度	1 ~ 100μm	0.001 ~ 10μm
粒子平均直径	10 ~ 20μm	1 ~ 2μm
颜色	乳白色或青白色	黄色或橙灰色

(2) 有害气体 有害气体就是在常温、常压下，在空气中呈现气态的物质。只有在高压、低温情况下才能液化。如煤气、氨气、氯气、一氧化碳等。常见有毒有害气体按其毒害性质和程度的不同，可分为刺激性气体和窒息性气体两大类。

刺激性气体是指对眼和呼吸道黏膜有刺激作用的气体，它是化学工业常遇到的有毒气体。刺激性气体的种类甚多，最常见的有氯、氨、氮氧化物、光气、氟化氢、二氧化硫、三氧化硫和硫酸二甲酯等。这类气体一般虽不会直接导致死亡，但也会影响人的健康，且长时间吸入也会致死。

窒息性气体是指能造成机体缺氧的有毒气体，可分为单纯窒息性气体、血液窒息性气体和细胞窒息性气体。如甲烷、乙烷、乙烯、一氧化碳、氰化氢、硫化氢等。此类气体对人体的危害较大，能在短时间内使人缺氧窒息、导致死亡，危害较大。

(3) 蒸气 蒸气是固体直接升华或液体蒸发所形成的气态物质。当温度降低时,它又可恢复成原来的固态或液态。如溶剂蒸发的蒸气、磷蒸气、汞蒸气、硝基苯的蒸气等。

在工业有害物中,主要指能对人体造成伤害的有害气体和蒸气。

(4) 余热 在生产过程中散发的热,包括对流热、辐射热,它们直接影响工作区的空气温度和相对湿度,影响人体舒适性和劳动效率。

2. 工业有害物的来源

(1) 粉尘的来源 粉尘主要来源有以下几个方面:

- 1) 固体物料的破碎和研磨。
- 2) 粉状物料的混合、筛分、包装及运输。
- 3) 可燃物的燃烧与爆炸,例如,煤或木材等炭化物燃烧时产生的烟尘。
- 4) 生产过程中物质加热产生的蒸气在空气中的氧化和凝结,如矿石烧结、金属冶炼等过程中产生的锌蒸气,在空气中冷却时,会凝结、氧化成氧化锌固体微粒。

(2) 有害气体、蒸气的来源 在化工、造纸、纺织物漂白、金属冶炼、浇铸、电镀、酸洗、喷漆等工业生产过程中常常会产生有害气体与蒸气。

(3) 矿井内有害物质的来源 矿井内空气中除有氧气(O_2)、氮气(N_2)、二氧化碳(CO_2)、水蒸气(H_2O)以外,还混有各种有害气体,如甲烷(CH_4)、一氧化碳(CO)、硫化氢(H_2S)、二氧化硫(SO_2)、二氧化氮(NO_2)、氨气(NH_3)、氢气(H_2)和矿尘等。

1) 二氧化碳(CO_2)。二氧化碳的主要来源有:有机物的氧化;人员的呼吸;煤和岩石的缓慢氧化,以及矿井水与碳酸性岩石的分解作用;爆破作业,矿井内火灾,煤炭自燃以及瓦斯、煤尘爆炸时,也能产生大量二氧化碳。此外,有的煤层或岩层能长期连续放出二氧化碳,甚至有的煤层在短时间内大量喷出或与大量煤粉同时喷出二氧化碳。发生这种现象时,往往会造成严重破坏性事故。

2) 一氧化碳(CO)。一氧化碳为无色、无味气体,来源于物质的不完全燃烧,对空气的相对密度为0.967,微溶于水,但易溶于氨水,与酸、碱不起反应,只能被活性炭少量吸附。矿井内爆破作业、煤炭自燃以及发生火灾或煤尘、瓦斯爆炸时都能产生一氧化碳。

3) 硫化氢(H_2S)。硫化氢是一种无色、带有臭鸡蛋气味的有毒气体,易溶于水。矿井内的 H_2S 主要是由硫化矿物水化和坑木等有机物腐烂所产生的。

4) 氮氧化物(NO_x)。空气成分中氮的氧化物主要是 NO_2 ,在燃烧、电镀、化工和矿井内进行爆破作业时会产生一系列氮的氧化物,如 NO 、 NO_2 , NO 在空气中又被氧化成 NO_2 。

5) 二氧化硫(SO_2)。二氧化硫为无色气体,具有强烈的硫黄气味及酸味,对空气的相对密度为1.434,易积聚在巷道底部,易溶于水。在化学纸浆和制酸工艺以及矿井内含硫矿物氧化或燃烧、含硫矿物爆破都会产生 SO_2 。含硫矿层也会涌出 SO_2 。

6) 甲烷(CH_4)。甲烷为煤矿开采过程中,从煤层中释放出来的气体,也是煤矿中经常遇到的主要的有害气体。

7) 其他有害物质。矿井内空气除了上述有害气体外,还含有其他一些有害物质,如在采掘生产过程中所产生的煤和岩石的细微颗粒(统称为矿尘)。矿尘对矿井内空气的污染不容忽视,对矿井生产和工人身体都有严重危害。煤尘能引起爆炸,矿尘能引起矿工尘肺病。

1.1.2 工业有害物卫生毒理学基础

1. 有害物侵入人体的途径

有害物质的有害作用在于侵入人体。侵入人体的途径有下面三条:

(1) 呼吸道 正常的人每天要呼吸 10 ~ 15m³ 的空气，吸入的空气经过鼻腔、咽部、喉头、气管、支气管后进入肺泡，并在肺泡内进行新陈代谢。若有害物质随空气被吸入，轻者会使上呼吸道受到刺激而有不适感，重者就会发生呼吸器官的障碍，使呼吸道和肺发生病变，造成支气管炎、支气管哮喘、肺气肿和肺癌等疾病。若突然吸入高浓度污染物，可能会造成急性中毒，甚至死亡。据统计，大约有 95% 的工业中毒都是由于工业有害物通过呼吸道入侵人体所致。

(2) 皮肤和黏膜 有些有害物质，能够通过皮肤和黏膜侵入人体。它经过毛囊空间，通过皮脂腺而被吸收；有的通过破坏了的皮肤入侵；也有的通过汗腺侵入人体。一般可经皮肤、黏膜侵入的有害物质有下面几类：

- 1) 能溶于脂肪或类脂肪的物质如有机铅化合物、有机磷化合物、有机锡化合物、苯的硝基化合物和氨基化合物以及苯、醇类化合物等。
- 2) 能与油脂的脂酸根相结合的物质如汞及汞盐类、砷的氧化物及砷盐类等。
- 3) 具有腐蚀性的物质如酸、碱、酚类等。

经皮肤吸收的有害物量的多少，除与脂溶性、水溶性和浓度有关外，还与环境温度、相对湿度、劳动强度等因素有关。环境温度高、湿度大、劳动强度大，则发汗量多，这样有害物质就容易黏附在皮肤上而被吸收。反之，吸收量可减少。因此，改善环境的温度、湿度条件，是减少有害物经皮肤入侵的重要措施。

(3) 消化道 在工业生产中，有害物质单纯从消化道侵入而吸收者为数不多。但是由呼吸道侵入的毒物，有可能随呼吸道的分泌物部分吞咽进入消化道后被吸收。这种通过消化道侵入有害物的危害性比前两条途径的要小得多。

2. 粉尘对人体的危害

粉尘对人体健康的影响取决于粉尘的性质、粒径及浓度。对人体的危害主要表现在以下两个方面。

(1) 引起尘肺病 一般粉尘进入人体肺部后，可引起各种尘肺病。有些非金属粉尘如硅、石棉、炭黑等，由于吸入人体后不能排除，将变成硅肺、石棉肺或尘肺。例如，含有游离二氧化硅成分的粉尘，在肺泡内沉积会引起纤维性病变，使肺组织硬化而失去呼吸功能，发生硅肺病。

(2) 引起中毒甚至死亡 有些毒性强的金属粉尘（铬、锰、镉、铅、镍等）进入人体后，会引起中毒以致死亡。例如，铅使人贫血，损伤大脑；锰、镉损坏人的神经、肾脏；镍可以致癌；铬会引起鼻中隔溃疡和穿孔，以及肺癌发病率增加。此外，它们都能直接对肺部产生危害。如吸入锰尘会引起中毒性肺炎；吸入镉尘会引起心肺功能不全等。粉尘中的一些重金属元素对人体的危害很大。表 1-2 示出了某些工业粉尘及其可能引起的疾病。

表 1-2 工业粉尘及其可能引起的疾病

粉尘的种类	可引起的疾病
燃烧排放的烟尘	佝偻病
氧化铅、铬化合物、氟化合物	中毒性疾病
铝、铁、锌尘	金属热症
植物尘	花粉症
羽毛、毛发	哮喘症

(续)

粉尘的种类	可引起的疾病
无机和有机物粉尘	慢性支气管炎
悬浮硅石粉	硅肺
炭粉	炭肺
铁粉	铁肺
铝粉	铝肺
香烟尘	香烟尘肺
焦油	
镭放射性矿物粉尘	肺癌
石英石粉、铬化合物尘	
氧化铁粉尘	
无机和有机物粉尘	流行性病、白喉、结核病
氟及氟化物尘	氟黑皮肤病及皮肤癌
镍尘	镍湿疹
可可、焦油	皮肤癌

3. 有害气体和蒸气对人体的危害

根据气体（蒸气）类有害物对人体危害的性质，大致可分为麻醉性、窒息性、刺激性、腐蚀性等四类。下面列举几种常见气体（蒸气）对人体的危害。

（1）汞蒸气（Hg） 汞蒸气是一种剧毒物质。即使在常温或0℃以下汞也会大量蒸发，通过呼吸道或胃肠道进入人体后便发生中毒反应。急性汞中毒主要表现在消化器官和肾脏，慢性中毒则表现在神经系统，产生易怒、头痛、记忆力减退等病症，或造成营养不良、贫血和体重减轻等症状。职业中毒以慢性中毒较多。

（2）铅（Pb） 铅蒸气在空气中可以迅速氧化和凝聚成氧化铅微粒。铅不是人体必需的元素，铅及其化合物通过呼吸道及消化道进入人体后，再由血液输送到脑、骨骼及骨髓各个器官，损害骨髓造血系统引起贫血。铅对神经系统也将造成损害，引起末梢神经炎，出现运动和感觉异常。儿童经常吸入或摄入低浓度的铅，会影响儿童智力发育和产生行为异常。

（3）苯（C₆H₆） 苯属芳香烃类化合物，在常温下为带特殊芳香味的无色液体，极易挥发。苯在工业上用途很广，有的作为原料用于燃料工业和农药生产，有的作为溶剂和黏合剂用于造漆、喷漆、制药、制鞋及苯加工业、家具制造业等。苯蒸气主要产生于焦炉煤气及上述行业的生产过程中。苯进入人体的途径是呼吸道或从皮肤表面渗入。短时间内吸入大量苯蒸气可引起急性中毒。急性苯中毒主要表现为其对中枢神经系统的麻醉作用，轻者表现为兴奋、欣快感，步态不稳，以及头晕、头痛、恶心、呕吐等，重者可出现意识模糊，由浅昏迷进入深昏迷或出现抽搐，甚至导致呼吸、心跳停止。长期反复接触低浓度的苯可引起慢性中毒，主要是对神经系统、造血系统的损害，表现为头痛、头昏、失眠，白细胞持续减少、血小板减少而出现出血倾向。

（4）二氧化碳（CO₂） CO₂是无色略带酸臭味的气体，对人的呼吸有刺激作用，对空气的相对密度为1.52。CO₂不助燃也不能供人呼吸，易溶于水。当肺泡中CO₂增多时，能刺激人的呼吸神经中枢，引起呼吸频繁，呼吸量增加，所以在急救受有害气体伤害的患者时，常常首先让其吸入含有5% CO₂的氧气以加强呼吸。但空气中CO₂含量过高时，又会相对地减少氧的含量，使人窒息。

（5）一氧化碳（CO） CO多数属于工业炉、内燃机等设备中燃料不完全燃烧时的产物，或

来自煤气设备的渗漏。CO 是一种对血液、神经有害的毒物。由呼吸道吸入的 CO 容易与血红蛋白相结合生成碳氧血红蛋白, CO 与血红蛋白的结合力比氧与血红蛋白的结合力大 200 ~ 300 倍, 碳氧血红蛋白的存在影响氧和血红蛋白的离解, 阻碍了氧的释放, 导致低氧血症, 引起组织缺氧。中枢神经系统对缺氧最敏感。缺氧引起水肿、颅内压增高, 同时造成脑血液循环障碍, 部分重症 CO 中毒患者, 在昏迷苏醒后, 经过两天至两个月的假愈期, 出现一系列神经—精神障碍等迟发性脑病。

(6) 二氧化硫 (SO_2) SO_2 主要来自含硫矿物氧化、燃烧, 金属矿物的焙烧, 毛和丝的漂白, 化学纸浆和制酸等生产过程, 含硫矿层也会涌出 SO_2 。它是无色、强刺激性的一种活性毒物, 在空气中可以氧化成 SO_3 , 形成硫酸烟雾, 其毒性要比 SO_2 大 10 倍。它对人的眼、呼吸器官有强烈的刺激作用, 使鼻、咽喉和支气管发炎。

(7) 硫化氢 (H_2S) 进入体内的 H_2S 在肺泡内很快就被血液吸收, 氧化成无毒的硫盐, 但未被氧化的 H_2S 则发生毒害作用。 H_2S 也很容易溶于黏膜表面的水分中, 与钠离子结合成硫化钠, 对黏膜有强烈的刺激作用, 可引起眼炎及呼吸道炎症, 甚至肺水肿。 H_2S 对人体全身的致毒作用在于它和氧化型细胞色素酶的三价铁结合, 使酶失去活性, 影响细胞氧化, 造成人体组织缺氧。空气中 H_2S 浓度过高 ($900\text{mg}/\text{m}^3$ 以上) 可直接抑制呼吸中枢, 引起窒息而迅速死亡。急性中毒后遗症是头痛与智力下降, 慢性中毒症状是眼球酸痛, 有灼伤感, 肿胀畏光, 并引起气管炎和头痛。

(8) 氮氧化物 (NO_x) 氮氧化物主要指 NO 和 NO_2 , 它们来源于燃料的燃烧及化工、电镀等生产过程。 NO_2 呈棕红色, 对呼吸器官有强烈刺激, 常导致各种职业病, 比如由高浓度 NO_2 中毒引起急性肺气肿, 以及由慢性中毒引起的慢性支气管炎和肺水肿。空气中 NO_2 的体积分数为 $1 \times 10^{-4}\%$ ~ $3 \times 10^{-4}\%$ 时, 可闻到臭味; 体积分数为 $13 \times 10^{-4}\%$ 时, 眼鼻有急性刺激感及胸部不适; 体积分数为 $25 \times 10^{-4}\%$ ~ $75 \times 10^{-4}\%$ 时, 肺部绞痛; 体积分数为 $300 \times 10^{-4}\%$ 以上时, 发生支气管炎及肺水肿死亡。NO 对人体的生理影响还不十分清楚, 它与血红蛋白的亲合力比 CO 还要大几百倍。如果动物与高浓度的 NO 相接触, 可出现中枢神经病变。

(9) 甲烷 (CH_4) 甲烷为无色、无味、无臭的气体, 对空气的相对密度为 0.55, 难溶于水, 扩散性较空气高 1.6 倍。虽然无毒, 但当浓度较高时, 会引起窒息。不助燃, 但在空气中具有一定浓度并遇到高温 ($650 \sim 750^\circ\text{C}$) 时能引起爆炸, 煤矿中经常发生的瓦斯爆炸事故, 其爆炸气体中的主要成分就是甲烷。

(10) 甲醛 (HCHO) 甲醛又称蚁醛, 是无色有强烈刺激性气味的气体, 相对空气的密度为 1.06, 略重于空气。几乎所有的人造板材、某些装饰布、装饰纸、涂料和许多新家具都可释放出甲醛, 因此它和苯是现代房屋装修中经常出现的有害气体。空气中的甲醛对人的皮肤、眼结膜、呼吸道黏膜等有刺激作用, 它也可经呼吸道吸收。甲醛在体内可转变为甲酸, 有一定的麻醉作用。甲醛浓度高的居室中有明显的刺激性气味, 可导致流泪、头晕、头痛、乏力、视物模糊等症状, 检查可见结膜、咽部明显充血, 部分患者听诊呼吸音粗糙或有干性罗音。较重者可有持续咳嗽、声音嘶哑、胸痛、呼吸困难等病状。

4. 工业有害物对人体危害程度的影响因素

影响有害物对人体危害程度的因素可概括为如下几类:

(1) 粉尘的粒径 粉尘的粒径是影响其对人体危害程度的一个重要因素, 粉尘的粒径越小对人体危害越大, 原因有两方面:

一方面, 粒径越小的粉尘越容易悬浮于空气中, 不易捕集, 并且比较容易通过鼻腔和咽喉进入人的气管、支气管甚至肺部。粒径大于 $10\mu\text{m}$ 的粒子, 几乎都被鼻腔和咽喉所阻隔, 而不

进入肺泡。对人体健康危害最大的是 $10\mu\text{m}$ 以下的悬浮颗粒——飘尘。飘尘经过呼吸道沉积于肺泡的沉积率与飘尘的粒径有很大的关系。 $0.1 \sim 10\mu\text{m}$ 的粒子有 90% 沉积于呼吸道和肺泡上，其中 $5\mu\text{m}$ 以上的粒子容易被呼吸道阻留，一部分在口、鼻中阻留，一部分在气管和支气管中阻留。在支气管的上皮细胞上长着纤毛，这些纤毛把黏附有粉尘的黏液送到咽喉，然后被人咳出去或者咽到胃里。粒径为 $2 \sim 5\mu\text{m}$ 的微粒大都在气管和支气管被阻留；粒径小于 $2\mu\text{m}$ 的微粒可进入人体的肺泡，粒径小于 $0.4\mu\text{m}$ 的微粒可自由地进出于肺部。尘粒粒径小的则易被肺泡吸收和溶解，因而不经肝脏的解毒就直接被血液和淋巴液输送至全身，造成对人体很大的危害，如图 1-1 所示。

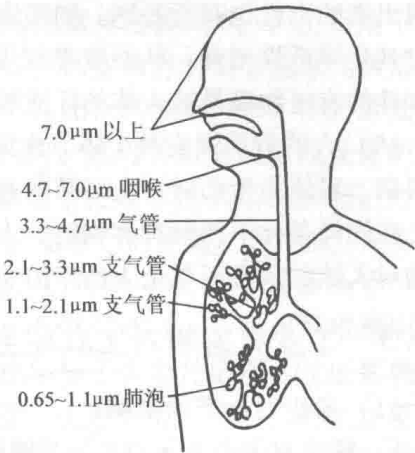


图 1-1 吸入呼吸器官的气溶胶粒子

另一方面，粉尘粒径越小，化学活性越大。因为单位质量的表面积增大，其表面活性也越大，会加剧对人体的生理效应。例如锌和一些金属本身并无毒，但将其加热后形成烟状氧化物时，可与体内蛋白质作用而引起发烧，发生所谓铸造热病。再有，粉尘的表面可能吸附空气中的有害气体、液体甚至细菌、病毒等微生物，故是污染物质传播的媒介物。有时，它还会和空气中的二氧化硫联合作用，加重对人体的危害。

(2) 有害物的成分及物理、化学性质 空气中有害物的组成以及毒性不同对人的危害程度也不同。若空气中存在着两种及两种以上有害物，其对人体健康的影响有的表现为单独作用，有的表现为相叠加或更强的作用。因此，在现实中应该考虑它们的联合作用与综合影响。

粉尘的化学成分直接影响对机体的危害性质，特别是粉尘中游离二氧化硅的含量。长期大量吸入含结晶型游离二氧化硅的粉尘可引起硅肺病。粉尘中游离二氧化硅的含量越高，引起病变的程度越重，病变的发展速度越快。但是直接引起尘肺的粉尘是指那些可以吸入到肺泡内的粉尘，一般称为呼吸性粉尘。因此，可吸入肺泡中的游离二氧化硅直接危害人体的健康。

(3) 有害物的含量 有害物含量越高对人体的危害越大。例如二氧化碳，当其体积分数为 2% 时，呼吸感到急促且伴有轻度头痛；体积分数增加到 3% 时，呼吸感到困难，同时有耳鸣和血液流动很快的感觉；体积分数达到 10% 时，呼吸将处于停顿状态且人失去知觉；当体积分数高达 20% 以上时，人将窒息死亡（表 1-3）。

(4) 有害物对人体的作用时间 很多有害物具有蓄积性，只有在体内蓄积达到中毒阈值时，才会产生危害。因此，随着作用时间的延长，毒物的蓄积量将加大。有害物在体内的蓄积是受摄入量、有害物的生物半衰期（即有害物在体内浓度减低一半所需时间）和作用时间三个因素影响的。

表 1-3 CO₂ 含量对人体的影响

CO ₂ 体积分数 (%)	对人体影响
1 ~ 2	持续作用会破坏人体电解质平衡
2	作用数小时后，人会感到轻度头痛和呼吸困难
3	头剧痛，出汗，呼吸困难
5	精神沮丧
6	视力下降，动作颤抖
10	昏迷，失去知觉
30	昏迷，抽搐，死亡